

BARREIRAS SONORAS EM ALTA VELOCIDADE FERROVIÁRIA

NUNO MIGUEL PEREIRA RIBEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Raimundo Moreno Delgado

Co-Orientador: Professor Doutor Rui Artur Bártolo Calçada

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miiec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À memória da minha avó...
...sempre presente.

*Afirmamos que a magnificência do mundo enriqueceu-se de uma beleza nova: a beleza da
velocidade.*

Marinetti, Filippo

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de deixar o profundo agradecimento a todos os que contribuíram, directa ou indirectamente, na elaboração da presente dissertação, e de forma muito especial:

- A todos os meus amigos que me ajudaram nas mais pequenas dúvidas, cujo apoio foi essencial;
- À empresa SonoFabril, pela disponibilidade dos seus trabalhos e catálogos;
- À empresa Maprel – Pré-Fabricados por ter colocado ao dispor informações que se tornaram indispensáveis;
- Ao Professor Rui Calçada pela total disponibilidade, mesmo se o tempo não lho permitisse, e pela capacidade única de dinamismo e criatividade, que marcou toda a diferença;
- Ao Professor Raimundo Delgado pela incomparável simpatia e sabedoria, que tornou a realização da dissertação num processo bem mais fácil e agradável;
- A meus pais, Maria Adelina e José Eduardo, e à minha irmã Joana, pela sensibilidade, preocupação e apoio demonstrados na presença constante, não só nestes últimos meses, mas em toda a minha aventura académica.

RESUMO

A ideia da alta velocidade ferroviária está cada vez mais presente na Europa e em todo o mundo moderno. No entanto, como consequência do aumento da velocidade ocorrem novos problemas cuja consideração se torna essencial. De entre eles destaca-se o aumento considerável do ruído, que é hoje uma das maiores problemáticas dos centros urbanos, e os aumentos das exigências estruturais nos elementos de mitigação eventualmente necessários, causados por novos fenómenos dinâmicos, até aí muitas vezes desprezados.

A presente dissertação insere-se no estudo dos dois fenómenos expostos no parágrafo anterior, pretendendo-se, portanto, a análise da influência da alta velocidade nas estruturas das barreiras sonoras, nomeadamente, os fenómenos de pressão/sucção a que estas estarão sujeitas.

Assim, em primeiro lugar, é feito um levantamento de todo um conjunto de normas e medidas de mitigação em relação ao ruído e desenvolvida de forma particular a utilização de barreiras sonoras como forma de combate ao mesmo. São expostos os diferentes tipos de barreira sonora que podem ser encontrados, bem como as suas características, vantagens e desvantagens.

Em segundo lugar, tendo por base a utilização de barreiras sonoras em betão armado, desenvolveu-se um tipo de análise paramétrica, com base nas regulamentações do Eurocódigo, de forma a ser analisada a influência de vários parâmetros, físicos e geométricos, na solução de dimensionamento final das barreiras sonoras.

Os resultados revelam, de facto, requerimentos de resistência consideravelmente maiores em barreiras sonoras aplicadas em proximidade a vias de alta velocidade que, caso não sejam tidos em conta, certamente se tornaram problemáticos. Em situações que exigem distâncias na ordem dos 2,5 metros entre as barreiras e as vias poderá mesmo assistir-se a incrementos de esforços que ultrapassem os 400%, quando as velocidades são elevadas.

PALAVRAS-CHAVE: Ruído, Barreira Sonora, Alta Velocidade, Betão-Armado, pressão/sucção.

ABSTRACT

The idea of high speed railway is increasingly present in Europe and all over the modern world. However, there are two essential disadvantages related to the increased speed. Among them stand out the increase of the noise generated, that is nowadays one of the biggest problems in urban centers, and the increase of the structural requirements caused by new dynamical phenomena, hitherto many times overlooked.

This dissertation studies the two phenomena exposed in the previous paragraph, ie, studies the influence of high-speed in noise barriers structures, as the wave of alternating pressure and suction, with which it is submitted.

So, it's first made an analysis of the standards and mitigation measures in relation to the noise, and is developed in particular the use of noise barriers as a way to combat it. A big number of different types of noise barriers are exposed, as their characteristics, advantages and disadvantages.

Secondly, based on the use of reinforced concrete in noise barriers, is developed a parametric analysis, based on the Eurocode Standards, to be tested the influence of some physical and geometrical parameters, in the final design solution of the noise barrier.

The results show, in fact, considerably higher resistance requirements to noise barriers constructed near to high-speed railways, which, if not taken into account, could become problematic. When is required distances below the 2,5 meters between the barriers and the railways, the loads could be 400% bigger, in high speed.

Keywords: Noise, Noise Barriers, High-Speed, Reinforced Concrete, Pressure/Suction.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJECTIVOS E ESTRUTURA DO TRABALHO	2
 2. EVOLUÇÃO DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS	 5
2.1. UM POUCO DE HISTÓRIA	5
2.2. ALTA VELOCIDADE: UMA NOVA ERA	7
2.2.1. SÉRIES SHINKANSEN	7
2.2.2. TGV	9
2.2.3. EXPANSÃO DA ALTA VELOCIDADE NA EUROPA	10
2.2.3.1. Eurostar e Thalys	11
2.2.3.2. Alemanha	12
2.2.3.3. Espanha	13
2.2.3.2. Portugal	13
2.3. MAGLEV: O FUTURO?	15
 3. A PROBLEMÁTICA DO RUÍDO	 19
3.1. INTRODUÇÃO	19
3.2. ENQUADRAMENTO LEGAL	20
3.2.1. DECRETOS IMPLEMENTADOS	20
3.2.2. LIMITAÇÃO DO RUÍDO	20
3.2.3. OUTROS ASPECTOS LEGAIS	22
3.3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO	23
3.3.1. NO PLANEAMENTO	24
3.3.2. NA FONTE	24
3.3.2.1. Equipamentos de Criação de Tracção	25
3.3.2.2. Contacto entre Comboio e Carris	25

3.3.2.3. Pressão Aerodinâmica	26
3.3.3. ENTRE A FONTE E O RECEPTOR.....	27
3.3.4. MANUTENÇÃO	27

4. BARREIRAS SONORAS

4.1. INTRODUÇÃO

4.2. PRINCÍPIOS TEÓRICOS ACERCA DO FUNCIONAMENTO DAS BARREIRAS SONORAS.....

4.2.1. ABSORÇÃO VS REFLEXÃO.....

4.2.2. DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO.....

4.3. PROCESSO DE ESCOLHA DO TIPO DE BARREIRA SONORA

4.4. MODELO ESTRUTURAL

4.4.1. BARREIRAS DO TIPO “PAINEL-POSTE”

4.4.2. BARREIRAS AUTO-SUSTENTÁVEIS.....

4.5. TIPOS DE BARREIRAS SONORAS

4.5.1. BERMAS SONORAS.....

4.5.2. BARREIRAS FLORESTAIS.....

4.5.3. PAINÉIS DE BETÃO ARMADO REVESTIDOS A BETÃO MADEIRA.....

4.5.4. PAINÉIS DE BETÃO REVESTIDOS A BETÃO POROSO

4.5.5. PAINÉIS EM BETÃO SEM REVESTIMENTO ACÚSTICO

4.5.6. PAINÉIS DE BETÃO LEVE.....

4.5.7. PAINÉIS METÁLICOS

4.5.8. PAINÉIS DE MADEIRA.....

4.5.9. PAINÉIS DE TRANSPARENTES.....

4.5.10. PAINÉIS PLÁSTICOS.....

4.5.11. PAINÉIS DE BORRACHA RECICLADA.....

4.5.12. PAINÉIS REVESTIDOS COM ELEMENTOS CERÂMICOS.....

4.5.13. BARREIRAS DE ALVENARIA

4.5.14. PAINÉIS DE BETÃO ARMADO EM CONSOLA.....

4.5.15. PAINÉIS DE BETÃO ARMADO COM PILARES INTEGRADOS

4.5.16. BARREIRAS DE PLANTADAS.....

4.5.17. BARREIRAS DE PEDRA.....

4.6. BOAS PRÁTICAS NA INSTALAÇÃO DE BARREIRAS SONORAS

4.6.1. ESCOAMENTO DE ÁGUA.....

4.6.2. EQUIPAMENTOS AO LONGO DA LINHA DA BARREIRA.....	71
4.6.3. SELAGEM DAS JUNTAS	72
4.6.4. BASE DA BARREIRA.....	72
4.6.5. DESCONTINUIDADES E EXTREMIDADES	73
4.6.6. ABERTURAS PARA EQUIPAMENTO E MANUTENÇÃO.....	75
4.7. BOAS PRÁTICAS NA INSTALAÇÃO DE BARREIRAS SONORAS	76
4.7.1. INOVAÇÃO ARQUITECTÓNICA.....	76
4.7.2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	78
4.7.3. BARREIRAS AQUÁRIO	80
4.7.4. NOVOS MATERIAIS E FORMAS	72
4.7.5. CURVATURAS E TOPOS DA BARREIRA	72
4.7. DISCUSSÃO DAS SOLUÇÕES	83

5. ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA BARREIRA SONORA EM AV

5.1. INTRODUÇÃO	85
5.2. O EXEMPLO DA LINHA COLOGNE-FRANKFURT	85
5.3. FUNDAMENTOS REGULAMENTARES	87
5.3.1. PESO PRÓPRIO.....	87
5.3.2. ACÇÃO DO VENTO.....	87
5.3.2.1. Eurocódigo	87
5.3.2.2. RSA	90
5.3.3. PRESSÃO AERODINÂMICA.....	91
5.3.4. COMBINAÇÃO DE ACÇÕES	93
5.4. PRESUPOSTOS E SIMPLIFICAÇÕES DE CÁLCULO	94
5.4.1. ESQUEMA ESTRUTURAL	94
5.4.2. MATERIAL.....	95
5.4.3. MEDIDAS GEOMÉTRICAS	96
5.4.4. COMBINAÇÃO DE CARGAS	96
5.4.5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DOS CÁLCULOS DE ESFORÇOS E ARMADURAS.....	99
5.5. CÁLCULO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	100
5.5.1. BARREIRA COM 5 METROS ENTRE POSTES	101
5.5.2. BARREIRA COM 15 CM DE ESPESSURA DE PAINEL.....	108

5.5.3. BARREIRA COM 4 METROS ENTRE POSTES	110
5.5.4. BARREIRA COM 7 METROS DE ALTURA	115
5.5.5. BARREIRA SIMPLEMENTE APOIADA EM 3 LADOS.....	118
5.5.6. ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO	120
5.5. CONCLUSÕES	121

6. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÃO	125
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	129

BIBLIOGRAFIA	131
---------------------------	------------

ANEXO A.....	133
---------------------	------------

AI – PAINEL DE DIMENSÃO 5000x5000x120 MM	134
--	-----

AII – PAINEL DE DIMENSÃO 5000x5000x150 MM	138
---	-----

AIII – PAINEL DE DIMENSÃO 4000x5000x120 MM	140
--	-----

AIV – PAINEL DE DIMENSÃO 5000x7000x120 MM.....	144
--	-----

AV – ÁREAS DAS ARMADURAS MALHASOL E DOS VARÕES CONSIDERADOS	146
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Comboio primordial (Lewis, 2001)	1
Fig. 2 – Primeira locomotiva de transporte de passageiros (Hamilton, 1968)	2
Fig. 3 – Primeiro comboio denominado de alta velocidade: ETR 200	2
Fig. 4 – 0 série Shinkansen	3
Fig. 5 – Projecto do novo Shinkansen E5 serie (JR East, 2008)	4
Fig. 6 – Distribuição das diferentes linhas de alta velocidade LGV	5
Fig. 7 – Rede ferroviária europeia e diferentes velocidades de serviço (RAVE, 2009)	6
Fig. 8 – TGV-TMST em serviço do Eurostar	7
Fig. 9 – PBA e PBKA lado a lado	7
Fig. 10 – 3ª geração ICE e mapa rede ferroviária alemã (Deutsche Bahn, 2009)	8
Fig. 11 – Alta Velocidade Espanhola (Fomento, 2008)	9
Fig. 12 – Actual Rede Ferroviária Portuguesa (CP, 2009)	10
Fig. 13 – Alta Velocidade Espanhola (Fomento, 2008)	11
Fig. 14 – Actual Rede Ferroviária Portuguesa (CP, 2009)	12
Fig. 15 – Hipotética Travessia Ferroviária Transatlântica em Vácuo (Hoffman, C., 2004)	12
Fig. 16 – Classificação dos períodos de referências (REFER, 2008)	21
Fig. 17 – Exemplo de Mapa de Ruído no Cais do Oriente (REFER, 2008)	22
Fig. 18 – Fontes de Ruído nas linhas ferroviárias (UCI, 2008)	25
Fig. 19 – Rail Dampers em cima e Wheel Dampers em baixo (Environmental Noise Directive, 2008)	26
Fig. 20 – Desenho esquemático do funcionamento das Barreiras Sonoras (Walker, J. et al, 2007) ...	30
Fig. 21 – Fenómeno de Refracção (Fleming, G. et al, 2000)	31
Fig. 22 – Utilização de Barreiras Reflectoras Paralelas (Fleming , G. et al, 2001)	32
Fig. 23 – Combinação entre Barreiras Reflectoras e Edifícios Comerciais (Sound Fighter, 2009)	33
Fig. 24 – Protecção Sonora das Zonas Habitacionais junto a Edifícios Comerciais (Sound Fighter, 2009)	33
Fig. 25 – Esquema para o cálculo da altura da barreira sonora (FEUP, 2009)	34
Fig. 26 – Barreiras do tipo “Painel-Poste”	36
Fig. 27 – a) Criação das Fundações. b) Sapata Contínua. c) Blocos de Betão Armado. (Fleming , G. et al, 2001)	37
Fig. 28 – Colocação do Poste no Cabouco (Durisol, 2009)	37
Fig. 29 – União do Poste por Parafusos à Fundação (Fleming , G. et al, 2001)	38
Fig. 30 – Utilização de elementos em betão entre postes (Durisol, 2009)	38
Fig. 31 – Painéis a toda a Altura à esquerda e Painéis Empilhados à direita	39
Fig. 32 – Montagem dos painéis entre os postes (Durisol, 2009)	39
Fig. 33 - Bermas Sonoras (Fleming , G. et al, 2001)	41
Fig. 34 – Barreiras Florestais	42
Fig. 35 – Atenuação Sonora pelo efeito da Localização do Cinturão (Rodrigues, V., 1984)	42

Fig. 36 – Atenuação Sonora pelo efeito da Largura do Cinturão (Rodrigues, V., 1984)	43
Fig. 37 – Atenuação Sonora considerando vários Tipos de Vegetação (Rodrigues, V., 1984)	43
Fig. 38 – Barreiras Sonoras revestida a blocos de Betão Madeira	44
Fig. 39 – Colocação do revestimento de Betão Madeira, e de Painéis já Revestidos (Fleming , G. et al, 2001)	44
Fig.40 – Absorção sonora dos painéis revestidos a betão madeira para espessuras de 130 mm (SonoFábril, 2009)	45
Fig.41 – Absorção sonora dos painéis revestidos a betão madeira para espessuras de 180 mm (SonoFábril, 2009)	45
Fig. 42 - Tratamento estético do Betão Madeira (SonoFábril, 2009)	46
Fig. 43 – Barreira Sonora revestida a Betão Poroso (SonoFábril, 2009)	46
Fig. 44 – Esquema das camadas de painéis revestidos a Betão Poroso (SonoFábril, 2009)	47
Fig. 45 – Absorção Sonora a diferentes frequências de painéis revestido a Betão Poroso (SonoFábril, 2009)	47
Fig. 46 – Painéis Empilhados revestidos de Betão Poroso	48
Fig. 47 – Vários tipos de pigmentação a aplicar ao Betão Poroso	48
Fig. 48 – Painéis em Betão sem revestimento acústico	48
Fig. 49 – Vários tipos de tratamento estético da superfície dos painéis de betão	49
Fig. 50 – Utilização de superfícies rugosas nos Painéis de Betão	50
Fig. 51 - Painéis de Betão Leve e sua Instalação (Durisol, 2009)	50
Fig. 52 – Barreiras de painéis metálicos	51
Fig. 53 – Painel Metálicos Reflectores (EMPIRE, 2009)	52
Fig. 54 – Corte e esquema de um Painel Metálico de Absorção (EMPIRE, 2009)	52
Fig. 55 – Coeficientes de Absorção Sonora para Painéis Metálicos de Absorção	53
Fig. 56 – Exemplos de utilização de Barreiras Sonoras de Madeira (Fleming , G. et al, 2001)	54
Fig. 57 – Vários Tipos de Painéis Transparentes	55
Fig. 58 – Efeitos criados para marcar a presença dos Painéis Transparentes	56
Fig. 59 – Vandalismo em Painéis Transparentes (Fleming , G. et al, 2001)	57
Fig. 60 - Barreiras Metálicas com Painéis Transparentes	57
Fig. 61 - Barreiras De Alvenaria com Painéis Transparentes	58
Fig. 62 – Barreira sonora com Painéis Plásticos (Sound Fighter, 2009)	59
Fig. 63 – Painéis em Borracha Reciclada	60
Fig. 64 – Exemplos de Revestimentos Cerâmicos. PHONBRICK a esquerda e Acoustic Brick à direita (Guiraud Freres, 2009)	61
Fig. 65 – Azulejo Cerâmico do tipo PHONI CERAM (Guiraud Freres, 2009)	61
Fig. 66 – Bloco Cerâmico PHONI CERAM (Guiraud Freres, 2009)	62
Fig. 67 – Coeficiente de Absorção Sonora do bloco PHONI CERAM (Guiraud Freres, 2009)	62
Fig. 68 – Barreiras Acústicas de Alvenaria, de origem cerâmica à esquerda e betuminosa à direita	63
Fig.69 – Exemplo de bloco de alvenaria em betão leve para barreiras do tipo absorvente (Leca® Sound Confort)	63

Fig. 70 – Bloco desenvolvido pela Faculdade de Engenharia da universidade do Porto (maxit ISOLSÓNICO®, 2003)	64
Fig. 71 – Coeficientes de absorção sonora a_s para o bloco de alvenaria Leca® Sound Confort (MELO, A.,2007).....	64
Fig. 72 – Exemplo de Grafites em barreiras de alvenaria.....	65
Fig. 73 – Painéis de Betão Armado Não Apoiados por Postes	65
Fig. 74 – Instalação dos Painéis de Betão Armado sobre a Fundação	66
Fig. 75 – Barreiras em forma de zig-zag (Fleming , G. et al, 2001).....	66
Fig. 76 – Painéis de Betão Armado com Pilares Integrados (WSDOT, 2009)	67
Fig. 77 – Instalação dos Painéis de Betão Armado (WSDOT, 2009)	68
Fig. 78 – Barreiras Plantadas	68
Fig. 79 – Barreiras de pedra (Fleming , G. et al, 2001).....	69
Fig. 80 – Aberturas em barreiras resultantes de mecanismos de escoamento de águas.....	70
Fig. 81 – Bons Comportamentos no Escoamento de Águas (Durisol, 2009)	71
Fig. 82 – Integração dos equipamentos ao longo da linha da barreira.....	71
Fig. 83 – Juntas em Barreiras Sonoras.....	72
Fig. 84 – Incorrecto Acondicionamento da Base do Pannel com o Terreno.....	73
Fig. 85 – Descontinuidades em Barreiras Sonoras.....	73
Fig. 86 – Regra a utilizar em descontinuidades (Fleming, G. 2001).....	74
Fig. 87 – Prolongamento entre o receptor e a extremidade da barreira (Fleming, G. 2001).....	74
Fig. 88 - Aberturas de Acesso em Barreiras Sonoras.....	75
Fig. 89 – Aberturas criadas pela Instalação de Equipamentos.....	75
Fig. 90– Barreira Sonora de Utrecht (ONL, 2009).....	76
Fig. 91 – Instalação da Barreira Sonora de Utrecht (ONL, 2009)	76
Fig. 92 – Pormenores da Barreira Sonora de Utrecht (ONL,2009).....	77
Fig. 93 – Sound Tube em Melbourne Austrália (Rugless, R., 1999)	77
Fig. 94 - Craigieburn Bypass a Norte de Melbourne (Schaik, L., 2004)	78
Fig. 95 – Utilização de Painéis Fotovoltaicos em Barreiras Sonoras (Rocha, J., 2006).....	79
Fig. 96 – Diferentes Configurações de Barreiras Sonoras aplicando Painéis Fotovoltaicos (Nordmann,T. Et al)	79
Fig. 97 - Modelo de Estudo do Isolamento Sonoro dos Líquidos (Coutinho, A., 2008).....	80
Fig. 98 - Redução Sonora obtida com Painéis de Água (à esquerda) e Óleo Vegetal (à direita) (Coutinho, A., 2008)	81
Fig. 99 - Painéis Kokosystems	82
Fig. 100 - Pipe Barrier da Van Campen Aluminium	82
Fig. 101 - Influência no campo acústico por barreiras curvas (Brunbauer, W., 2006).....	83
Fig. 102 - Utilização de Perfis em T no Topo das Barreiras Sonoras.....	83
Fig. 103 – Exemplos dos danos das barreiras varificados na linha Cologne – Frankfurt (B. Hoffmeister, 2007)	86
Fig. 104 – Testes de medição realizados nas barreiras sonoras (B. Hoffmeister, 2007)	87

Fig. 105 – Factor $c_e(z)$ com a altura para diferentes zonas de rugosidade (EN 1991-1-4, 2005)	88
Fig. 106 – Análise dos valores $c_{pe,10}$ e $c_{pe,1}$ (EN 1991-1-4, 2005)	89
Fig. 107 – Valor Característico da Pressão Dinâmica do Vento para a Zona A (RSA, 2009)	91
Fig. 108 – Valores característicos das acções q_{1k} para superfícies verticais simples paralelas à via..	92
Fig. 109 – Esquema estrutural adoptado	93
Fig. 110 – 3ª geração ICE e mapa rede ferroviária alemã (Deutsche Bahn, 2009).....	95
Fig. 111 – Cargas Horizontais Aplicadas à Barreira	96
Fig. 112 – Cálculo da reacção do pilar no caso da resultante da sucção aerodinâmica se encontrar a meio da largura do painel	97
Fig. 113 – Cálculo da reacção do pilar no caso da resultante da sucção se encontrar sobre o poste.	98
Fig. 114 - Cargas Aerodinâmicas Equivalentes	100
Fig. 115 – Variação da área da armadura para painéis internos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço	101
Fig. 116 – Variação da área da armadura para painéis internos com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV	102
Fig. 117 – Variação da área da armadura nos painéis externos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço	102
Fig. 118 – Variação da área da armadura para painéis de extremidade com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV	102
Fig. 119 – Secção admitida do Pilarete de suporte dos painéis	104
Fig. 120 – Variação da área da armadura para pilares internos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço	104
Fig. 121 – Variação da área da armadura para pilares internos com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV	105
Fig. 122 – Variação do espaçamento dos estribos em pilares internos com a distância ao eixo da via AV a diferentes velocidade	105
Fig. 123 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço	106
Fig. 124 - Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV	106
Fig. 125 – Variação do espaçamento dos estribos em pilares de extremidade com a distância ao eixo da via AV a diferentes velocidade	107
Fig. 126 – Soluções de armadura para os pilaretes internos à esquerda e de extremidade à direita	107
Fig. 127 – Soluções de armadura para os pilaretes internos à esquerda e de extremidade à direita	108
Fig. 128 – Variação da área da armadura para painéis internos com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV	108
Fig. 129 – Variação da área da armadura para painéis de extremidade com 15 cm de espessura com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço.....	109
Fig. 130 – Variação da área da armadura para painéis internos com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV	109
Fig. 131 – Variação da área da armadura para painéis internos de 4 m de largura com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço	110
Fig. 132 – Variação da área da armadura para painéis internos de 4 m de largura com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV	110

Fig. 133 – Variação da área da armadura para painéis de extremidade de 4 m de largura com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço	111
Fig. 134 - Variação da área da armadura para painéis de extremidade de 4 m de largura com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV.....	111
Fig. 135 – Variação da área da armadura para pilaretes internos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço, em painéis de 4m de largura	112
Fig. 136 – Variação da área da armadura para pilaretes internos com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV, em painés de 4 m de largura	112
Fig. 137 – Variação do espaçamento dos estribos em pilaretes internos com a distância ao eixo da via AV a diferentes velocidade no caso de painéis com 4 m de largura	113
Fig. 138 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço, em painéis de 4m de largura .	113
Fig. 139 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV, em painés de 4 m de largura	114
Fig. 140 – Variação do espaçamento dos estribos em pilaretes de extremidade com a distância ao eixo da via AV a diferentes velocidade no caso de painéis com 4 m de largura.....	114
Fig. 141 – Solução da armadura dos pilaretes internos, à esquerda, e de extremidade à direita, para a utilização de painéis de 4 metros de largura.....	115
Fig. 142 – Variação da área da armadura para pilaretes internos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço, em painéis de 7 m de altura	116
Fig. 143 – Variação da área da armadura para pilaretes internos com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV, em painés de 7 m de altura	116
Fig. 144 - Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço, em painéis de 7m de largura	117
Fig. 145 – Variaçã da área da armadura para pilaretes de extremidade com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV, em painés de 7 m de altura	117
Fig. 146 – Soluções de armadura para os pilaretes internos, à esquerda, e de extremidade, à direita, de suporte a painéis de 7 metros de altura	118
Fig. 147 – Análise pelos elementos finitos de um painel de 5m de altura apoiado em 3 lados	119
Fig. 148 – Análise pelos elementos finitos de um painel de 7m de altura apoiado em 3 lados	119

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Séries Shinkanses (Railway Technology, 2009).....	4
Quadro 2 – Limites Impostos pelo RGR	21
Quadro 3 – Espessura, Densidade e Perda na Transmissão de diferentes Materiais	31
Quadro 4 – Redução da Perda na Transmissão em função da percentagem de aberturas	70
Quadro 5 – Categorias do Terreno em termos de Rugosidade	88
Quadro 6 – Coeficiente de Pressão para Paredes	90
Quadro 7 – Valores de Pressão Dinâmica do Vento para diferentes Zonas e Rugosidades	97
Quadro 8 – Valores Recomendados dos Coeficientes ψ	98

INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Assistimos hoje à evolução de um mundo global e capitalizado, onde a troca de informação, pessoas e bens se tornou essencial ao bom desenvolvimento económico e social a nível regional, nacional, continental e intercontinental. De facto, as fronteiras das nações modernas foram abertas e as trocas sociais e económicas a nível global são hoje fortemente incentivadas de forma a serem criados mercados cada vez maiores e civilizações cada vez mais tolerantes.

Esta visão encontra especial importância entre os países da União Europeia, considerando o espírito comunitário que se pretende impingir aos seus cidadãos, com o objectivo de criar um conjunto de estados desenvolvidos que se caracterizem pela igualdade de oportunidades.

Vivemos de facto na era da informação e, depois do automóvel, do avião, dos média e internet, o mundo assiste ao desenvolvimento de outro tipo de tecnologia que tem vindo a revolucionar os convencionais sistemas de intercâmbio global: a alta velocidade ferroviária.

O transporte ferroviário, o primeiro meio de transporte terrestre de massas, desde há muito que assumiu um papel preponderante nas sociedades modernas. De facto, desde a revolução industrial que o comboio tem vindo a ser utilizado de forma insistida, como resultado da sua segurança, baixos custos e capacidades de carga. Foi também, a seguir ao barco, o primeiro responsável pelas primeiras manifestações de globalização, permitindo desde a época a troca de forma rápida de pessoas e bens.

O comboio perde, no entanto, enorme notoriedade com o surgimento da produção em massa de automóveis, e com a criação dos vãos comerciais, cada vez mais económicos. Os transportes ferroviários recolheram-se ao papel de meio de ligação a meias distâncias, utilizado principalmente pela classe média e média baixa.

A alta velocidade ferroviária surge, porém, no Japão, como medida de combate à sobrelotação da principal linha do país. A França, atenta ao sucesso dessa tecnologia, desenvolve também a ideia da alta velocidade, através do TGV, com o objectivo de revitalizar o transporte ferroviário francês. A França ganha a aposta e o interesse pela alta velocidade expande a rede não só por toda a França, mas também para fora desta.

Como resultado da necessidade, nos dias de hoje, de velocidade na troca de informação, pessoas e bens, esta tecnologia acaba por assumir um especial interesse pelos responsáveis da Comunidade Europeia e, com a expansão da alta velocidade para outros estados europeus, cria-se a ideia da criação de uma rede transeuropeia de alta velocidade ferroviária.

Portugal decidiu, com o apoio da UE, também apostar na construção das suas próprias linhas AV, de forma a não ficar desligado desta rede transeuropeia, pelo que, a actualização, a nível nacional, acerca da tecnologia torna-se essencial.

Este mesmo mundo global e capitalista é, no entanto, também um mundo com novas preocupações, nomeadamente ao nível da saúde e meio ambiente. E a alta velocidade, que permite encurtar as distâncias do mundo global, é, em contra partida, responsável por impactos preocupantes a esse nível. Um dos mais significativos desses impactos é a criação de ruído em volumes bem acima dos aceitáveis. Sendo o ruído um dos impactos que mais afecta o bem estar das populações, torna-se essencial a aplicação de medidas na sua mitigação na construção dos projectos relacionados com a alta velocidade.

Inerentes à alta velocidade estão também novos desafios a nível estrutural dos elementos que constituem as infra-estruturas necessárias à sua implementação. De facto, o aumento considerável da velocidade é responsável por novos fenómenos dinâmicos que põem em causa os métodos tradicionais de dimensionamento das mais elementares estruturas que constituem as ferrovias. Assim, existe uma grande necessidade de novos estudos que permitam a criação de regulamentações apropriadas na engenharia da construção na alta velocidade.

O presente trabalho insere-se no âmbito destes dois últimos parágrafos, e consistirá na análise da influência da alta velocidade numa infra-estrutura de mitigação ao impacto do ruído: as barreiras sonoras.

1.2. OBJECTIVOS E ESTRUTURA DO TRABALHO

Com este trabalho pretende-se perceber até que ponto a alta velocidade em vias ferroviárias influencia o dimensionamento estrutural dos elementos que as constituem, particularmente as barreiras sonoras. Tendo isto em consideração, definiram-se os seguintes objectivos a serem atingidos no desenvolvimento do estudo:

- Perceber a importância da alta velocidade ferroviária na actualidade e no futuro da Europa, em especial no contexto nacional;
- Identificar o ruído como um dos principais impactos negativos resultantes da utilização da tecnologia da alta velocidade, e identificar as suas fontes;
- Esclarecer as consequências ambientais, sociais e económicas da não protecção dos receptores sensíveis, contra o ruído;
- Clarificar o enquadramento legal acerca do ruído, em contexto nacional e comunitário;
- Expôr as mais viáveis medidas de mitigação do ruído a serem aplicadas em alta velocidade ferroviária;
- Perceber o contexto de aplicação de barreiras sonoras, e as suas várias possíveis utilizações;
- Enumerar as várias vantagens e desvantagens de utilização das barreiras sonoras em vias de comunicação;
- Perceber os princípios do funcionamento das barreiras sonoras como medida de mitigação do ruído;
- Identificar todo o conjunto de soluções de barreiras sonoras disponíveis no mercado, bem como as suas características essenciais, vantagens e desvantagens;
- Perceber as tecnologias e métodos de instalação das barreiras;

- Identificar as melhores soluções de barreiras sonoras para a aplicação específica em alta velocidade ferroviária;
- Clarificar a aplicação das normas europeias, nomeadamente dos Eurocódigos, no contexto das barreiras sonoras, e perceber os modelos a adoptar nos seus dimensionamentos;
- Proceder a um estudo paramétrico acerca da influência dum conjunto de variáveis presentes nos Eurocódigos no dimensionamento das barreiras sonoras;
- Tirar as devidas conclusões acerca da poupança na armadura da alteração das medidas geométricas que caracterizem determinado tipo de barreiras sonoras, utilizando betão armado;
- Concluir a influência da alteração dos esquemas estruturais da barreira sonora nos esforços que estas deverão suportar.

Considerando tais objectivos o trabalho foi organizado em 6 capítulos, incluindo a presente introdução.

No capítulo 2 tenta-se fazer uma contextualização da alta velocidade, percebendo a sua evolução e o caminho que seguirá no futuro. Aprofunda-se, naturalmente, de forma particular, o contexto nacional, sendo expostas as características dos projectos em estudo.

Em relação ao capítulo 3, é exposto toda a evolução dos requisitos legais acerca do ruído, bem como as consequências do impacto sonoro, responsáveis pela criação dessas mesmas normas. Várias alternativas de mitigação desse impacto são também apresentadas.

O capítulo 4 insere-se todo no aprofundamento da medida de mitigação do ruído o qual o presente trabalho trata: as barreiras sonoras. De facto, é feita uma introdução onde se faz uma contextualização das barreiras sonoras, apresentando os seus campos de aplicação e as vantagens e desvantagens da sua utilização. Explica-se como actuam as barreiras em relação ao bloqueio da propagação do ruído, e como se deve proceder ao cálculo da altura necessária para o correcto isolamento sonoro. É feita a apresentação de um conjunto de soluções diferentes para utilização em barreiras sonoras, que se podem encontrar actualmente no mercado, bem como soluções inovadoras que possam esclarecer um pouco acerca do futuro das barreiras. Termina-se com uma pequena análise das situações mais práticas e económicas possíveis de serem aplicadas às vias de alta velocidade.

O estudo numérico é feito no capítulo 5, e consiste na análise paramétrica da influência de vários factores na solução de dimensionamento final dos elementos que constituem a barreira. São, então, feitos vários dimensionamentos, fazendo variar os parâmetros dos quais este depende, tal como: a velocidade de serviço da via, a distância da barreira à ferrovia, a geometria da barreira e o esquema estrutural da mesma. Podem-se também encontrar neste capítulo os fundamentos regulamentares em que se basearam os cálculos.

Por fim, no último capítulo, são expostas as conclusões tiradas ao longo da elaboração do trabalho.

2

EVOLUÇÃO DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS

2.1. UM POUCO DE HISTÓRIA

O surgimento dos primeiros comboios reporta-se a mais de 500 anos atrás. Inicialmente impulsionados á força humana ou animal (Fig. 1), é quando surgem as locomotivas a vapor, em meados de 1820 na Inglaterra, que se pode falar de um verdadeiro sistema de transporte moderno, tornando-se o primeiro meio de transporte terrestre de massas.

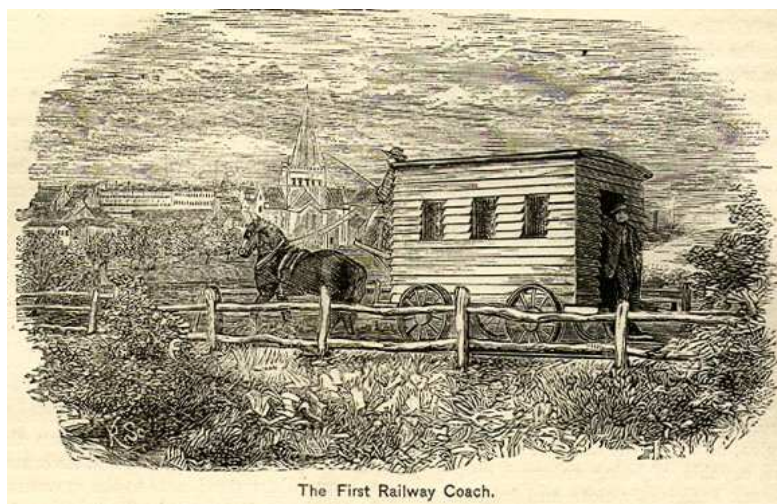


Fig. 1 – Comboio primordial (Lewis, 2001)

Os primeiros indícios de utilização de carris surge por volta do século 600 DC, na Grécia, numa linha com cerca de 6 a 8,5 Klm, que se acredita ter sido usada para o transporte de barcos, através da força humana, utilizando carris de calcário para se obter a tracção necessária (Lewis, 2001). Carris de madeira mais modernos começam a ser utilizados em 1550's na Alemanha para facilitar o transporte de materiais de e para as minas (Georgius Agricola, 1913). Esta tecnologia espalha-se por toda a Europa e em 1600 chega à Inglaterra. Os primeiros avanços no sentido do surgimento do comboio dão-se primeiro com a utilização de vários vãos de carga puxados por um único cavalo e depois a utilização dos carris para transporte de materiais de construção para os locais das obras. (Lewis, 2001)

A criação do primeiro motor a vapor deveu-se ao inventor escocês James Watt, que tendo por base os estudos de Thomas Newcomen inventou um sistema de bombeamento da água para fora das minas, aperfeiçoado pelo seu discípulo William Murdoch. (Gordon, 1910)

O primeiro modelo de uma locomotiva a vapor seria, no entanto, criada só em 1794 pelo americano John Fitch, e a primeira locomotiva à escala real pelo engenheiro britânico Richard Trevithick em 1804 (Fig. 2), contando a história que surgiu de uma aposta com Samuel Homfray, ferreiro mestre local. A primeira demonstração seria feita pelo próprio Trevithick num pedaço de linha circular chamada “Catch-Me-Who-Can”. (Hamilton, 1968)

Seriam as guerras napolitanas a impulsionar de vez o desenvolvimento e utilização das locomotivas, e em 1825 surge a primeira linha ferroviária de acesso público, criada por George Stephenson. (Hamilton, 1968)

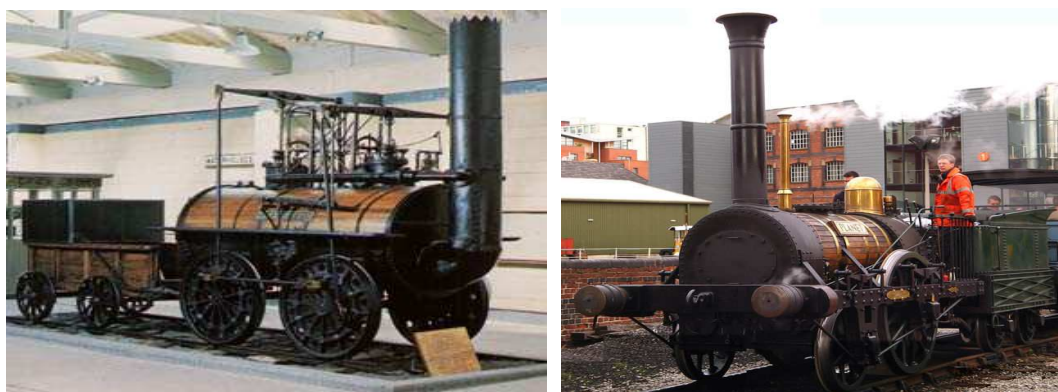


Fig. 2 – Primeira locomotiva de transporte de passageiros (Hamilton, 1968)

A locomotiva assumirá um papel fundamental na revolução industrial em meados da segunda metade do século XVIII, e com as conseqüentes invenções do motor a diesel e do motor eléctrico, esta possuirá o monopólio do transporte terrestre por toda a Europa e EUA, até ao conveniente desenvolvimento e comercialização do automóvel individual e das linhas aéreas, já no século XX.

Com o surgimento de novos meios de transporte mais flexíveis e económicos, os comboios perderam notoriedade, cujo serviço limitava-se à exploração das deslocações entre centros urbanos a média distância. De forma a os tornar novamente mais competitivos, o desenvolvimento dos transportes ferroviários deu-se essencialmente no sentido de velocidades crescentes.

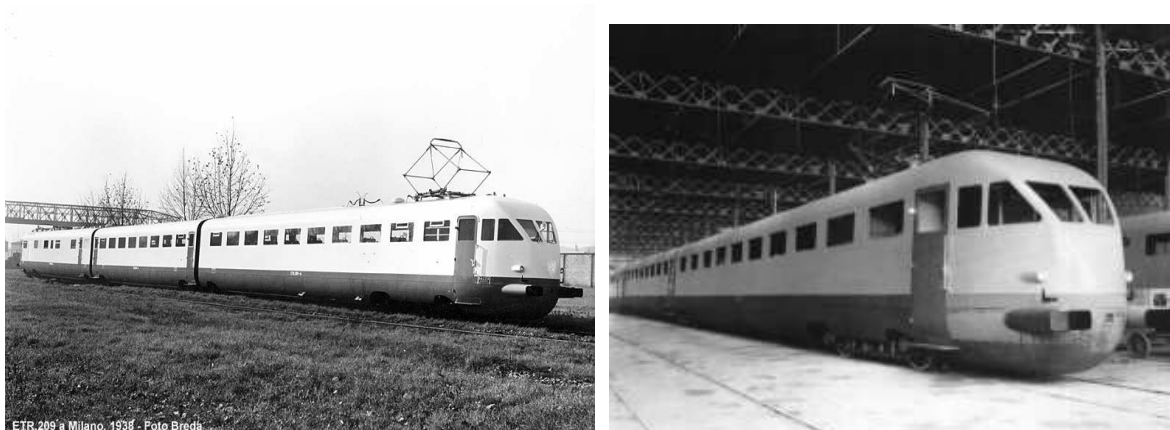


Fig. 3 – Primeiro comboio denominado de alta velocidade: ETR 200

Em julho de 1939, surge o primeiro denominado comboio de alta velocidade em Itália, chamado de ETR 200. Ligava Milão a Florença a uma velocidade média de 165 Km/h, com velocidade de topo de 203 Km/h. No entanto com o Início da segunda grande guerra, a sua produção pára. (Cornolo G. 1988)

É, no entanto o Japão e de seguida a França quem dão o verdadeiro impulso nas linhas ferroviárias de alta velocidade. O comboio de alta velocidade revelou-se objecto de grande interesse económico a nível regional e nacional. Nota-se já a sua forte presença pelas potências asiáticas, nomeadamente China, Coreia do Sul e obviamente Japão. Por toda a Europa, assim como nos EUA, têm-se intensificado a construção de novas linhas e redes. Tem-se verificado ainda, nomeadamente na Europa, um fenómeno de criação de redes mais abertas entre nações, o que tem vindo a permitir a mais rápida e fácil circulação de pessoas e bens entre os diferentes estados, traduzindo-se em evidentes vantagens económicas.

2.2. ALTA VELOCIDADE: UMA NOVA ERA

2.2.1. SÉRIES SHINKANSEN

Em Outubro de 1964 é criado no Japão o primeiro comboio de alta velocidade contemporâneo com elevada capacidade de carga (12 carruagens, apesar dos modelos subsequentes serem reduzidos a 6). A ideia de alta velocidade surgiu da necessidade de resolver a elevada sobrelotação da linha ferroviária entre Tóquio e Osaka. É assim criada a linha de alta velocidade Shinkansen que seria servida pelo 0 série (Fig. 4), inicialmente sem denominação por ser o único da sua espécie. Este servia com velocidades médias de 200 Km/h e com velocidade máximas de 256 Km/h, algo de incomparável na época.



Fig. 4 – 0 série Shinkansen

A sua produção continuou de 1963 a 1986, e só foi retirado de serviço em 30 de novembro de 2008, mas ainda hoje existem comemorações á sua memória por ter sido o impulsionador do comboio de alta velocidade como o conhecemos hoje.

Novas séries Shinkansen têm sido desde então desenvolvidas, cada vez mais seguras, confortáveis e acima de tudo rápidas. No Quadro1 são apresentadas todas as series Shinkansen, bem como algumas das suas características.

Hoje o Japão é talvez o país com a rede de alta velocidade mais completa e desenvolvida de todo o mundo.

Quadro 1 – Séries Shinkansen (Railway Technology, 2009)

Séries	Ano Criação	Nº Carruagens	Aceleração Km/h/s	Velocidade Máx. de serviço Km/h
100	1984	4/6	1,6	220
200	1980	10	1,6	240
300	1992	16	1,6	270
400	1992	7	1,6	240
500	1995	8/16	1,6/2,0	300
700	1997	16	1,6/2,0	285
700T	2007	12	2,0	300
N700	2007	8/16	2,6	300
800	2004	6	2,5	260
E1	1992	12	1,6	240
E2	1995	8/10	1,6	260
E3	1995	6/7	1,6	275
E4	1997	8	1,65	240

Está já em fase de projecto o novo série Shinkansen, E5, que tem por base o comboio experimental Fastech 360S que atingiu 405 Km/h nos testes realizados.

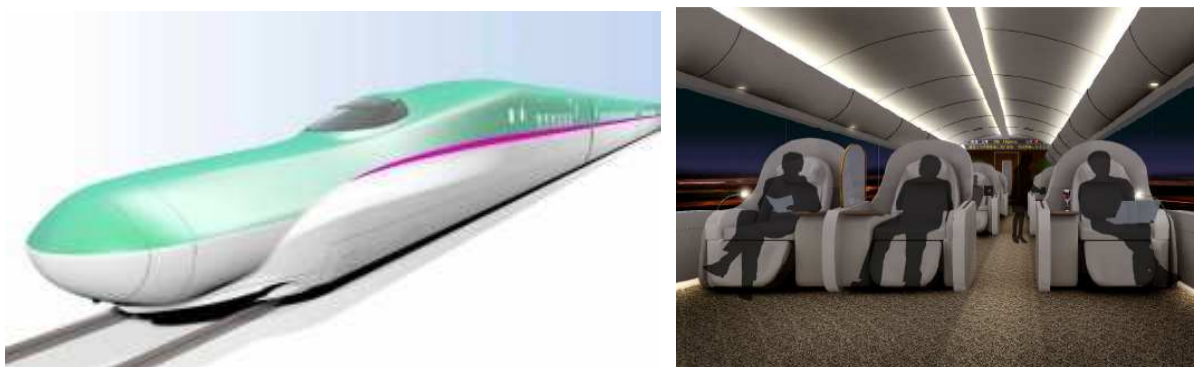


Fig. 5 – Projecto do novo Shinkansen E5 serie (JR East, 2008)

Será um comboio de alumínio, de 10 carruagens e com uma velocidade máxima de serviço de 360 Km/h. Terá um inovador sistema de travagem de emergência, chamado air breaking, muito utilizado na aviação. É esperado que o primeiro modelo entre em serviço em meados de 2011.(JR East, 2008)

A rede Shinkansen é hoje a mais utilizada rede de alta velocidade do mundo, sendo que até ao ano 2000 já tinha servido mais de 5 biliões de pessoas, pelo que se tornou por um lado num negócio de grande rentabilidade económica pelos investidores, e por outro, indispensável à economia regional e

nacional e mesmo ao normal quotidiano dos japoneses, marcando uma nova era nos transportes. (Hood, C. P. 2006)

2.2.2. TGV

O TGV (de *train à grand vitesse*, comboio de alta velocidade em francês), é criado em França e surge como o primeiro comboio de alta velocidade na Europa.

A ideia do TGV foi proposta em meados de 1960, logo após a criação da primeira linha de alta velocidade no Japão, numa época em que o governo francês apoiava de forma efusiva o desenvolvimento de novas tecnologias. Começou então a ser desenvolvido durante os anos 70 pela SNCF, a operadora ferroviária francesa, e em 1981 dá-se a viagem inaugural da primeira linha de alta velocidade entre Paris e Lyon.

O TGV foi desde logo um sucesso, pelo que não demorou muito a serem abertas novas linhas por toda a França. Hoje em dia, a rede de linhas de alta velocidade Frances (LGV) (Fig.6) é muito completa, e encontra-se dividido nas seguintes linhas:

- LGV Atlantique
- LGV Est
- LGV Interconnexion Est
- LGV Nord
- LGV Méditerranée
- LGV Picardie
- LGV Rhône-Alpes
- LGV Rhin-Rhône
- LGV Sud-Est
- LGV Sud Europe Atlantique



Fig. 6 – Distribuição das diferentes linhas de alta velocidade LGV

O sucesso do TGV em França é bem explícito nos números que o sustentam. E se no ano da sua criação,

o TGV serviu 1,26 milhões de pessoas, em 28 de Novembro de 2003 já tinha transportado mais de um bilhão de passageiros. Espera-se atingir a marca dos dois bilhões já em 2010. (Pepy, G. 2006)

Esse sucesso é também verificado nos vários recordes adquiridos pelo TGV. O primeiro comboio de alta velocidade da linha TGV, o TGV 001 com turbina a gás, bateu o recorde de velocidade aos 318Km/h, que ainda hoje se mantém como a máxima velocidade atingida por um comboio não eléctrico. Em 1990 O TGV bateu novo recorde do comboio de alta velocidade convencional mais rápido atingindo os 515,3 Km/h, recorde esse novamente batido pelo mesmo em 3 de Abril de 2007, alcançando os 574,8 Km/h. Mais rápido apenas o revolucionário Maglev. (TGV, 2009)

O TGV é responsável pelo desenvolvimento das tecnologias mais avançada em alta velocidade ferroviária, sendo a base para grande parte dos comboios de alta velocidade de todo o mundo.

2.2.3. EXPANSÃO DA ALTA VELOCIDADE NA EUROPA

A ideia da criação de uma rede ferroviária de alta velocidade europeia (Fig. 7) está cada vez mais a tornar-se realidade, sendo que hoje em dia por toda a Europa estão vindo a ser desenvolvidos, em alguns casos já postos em prática, um grande número de novos projectos de alta velocidade ferroviária.

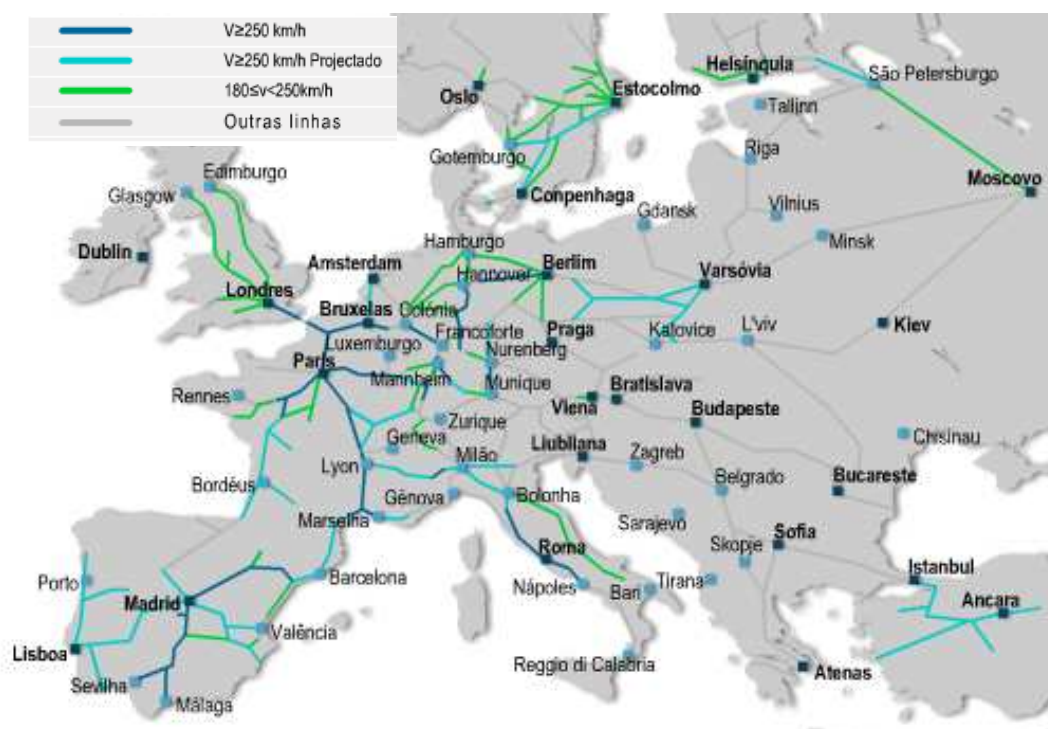


Fig. 7 – Rede ferroviária europeia e diferentes velocidades de serviço (RAVE, 2009)

Além da França, países como a Alemanha, Bélgica, Holanda, Itália e Espanha, têm já sistemas avançados de alta velocidade, com linhas que permitem o alcance dos 300 Km/h entre as principais cidades. Outros países, nomeadamente o Reino Unido, a Suécia e mesmo Portugal, apesar de não possuírem linhas com estas capacidades, possuem já boas condições que permitem o alcance de velocidades consideráveis nas suas vias ferroviárias, na ordem dos 250 Km/h.

Não sendo o âmbito específico deste trabalho, será apenas exposto de forma pouco aprofundada o estado da alta velocidade nos países mais relevantes.

2.2.3.1. Eurostar e Thalys

A rede LGV cresceu tanto, que se expandiu inclusive para os países vizinhos, criando a ideia actual de uma rede europeia de linhas ferroviárias de alta velocidade. Este fenómeno resultou na origem de outras linhas de alta velocidade servidas por máquinas baseadas no TGV, mas com novas tecnologias estrangeiras. É o caso do Eurostar e mais tarde do Thalys.

O Eurostar entrou em serviço em 1994 e faz a ligação entre Paris e Lille do lado de França, a Kent e Londres em Inglaterra, unindo, portanto as duas margens do Canal da Mancha e ligando o Reino Unido ao resto da Europa. Representa desta forma um papel económico fundamental, permitindo a rápida e fácil troca de pessoas e bens entre dois dos maiores pilares europeus, até aí tarefa de alguma dificuldade, criada pelo isolamento geográfico do Reino Unido. Existe ainda uma ramificação desta linha que se prolonga até Bruxelas na Bélgica e um serviço especial de ligação entre Londres e a DisneyLand Paris. (Eurostar, 2009)



Fig. 8 – TGV-TMST em serviço do Eurostar

O serviço Eurostar é operado pelo Classe 373, ou TGV-TMST (Fig. 8), um comboio de alta velocidade de 18 carruagens com uma velocidade de serviço que chega aos 300 Km/h. (Eurostar, 2009)

O Thalys é um operador internacional de alta velocidade ferroviária com o objectivo de ligar Paris a Amesterdão. Entra em serviço em 4 de junho de 1996, numa ideia de complementaridade com as linhas Eurostar, saindo de Bruxelas e passando por Cologne antes de chegar à Holanda. Numa primeira fase do projecto objectivava-se ainda uma extensão a Frankfurt, mas devido à falta de capacidade de abastecimento eléctrico necessário às linhas do Thalys por parte das autoridades alemãs, tal ideia foi deixada de parte. (Thalys, 2009)

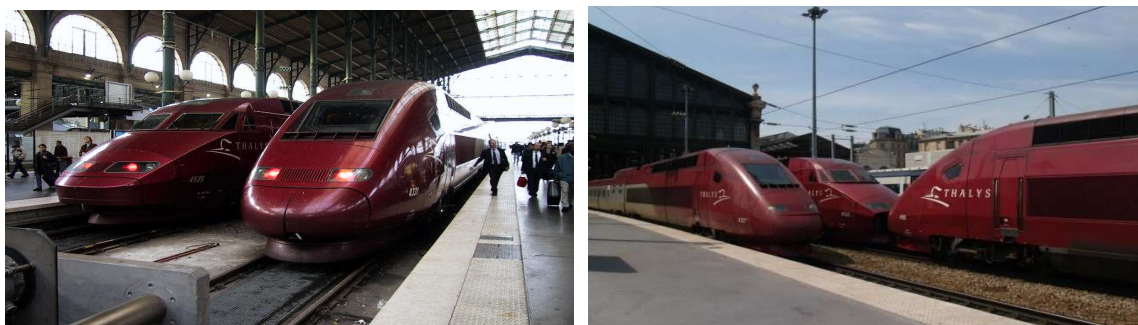


Fig. 9 – PBA e PBKA lado a lado

São utilizados dois comboios de alta velocidade nestas linhas, ambos, como já foi dito, derivados do TGV francês. O primeiro é o PBA (Paris-Bruxelas-Amesterdão), baseado no TGV Réseau, de 10 carruagens e atinge os 300Km/h de velocidade de serviço. O segundo, PBKA (Paris-Bruxelas-Koln-Amesterdão), é um derivado do TGV Duplex, que tem a particularidade *bi-level*, ou seja, possui dois andares o que se traduz numa capacidade de carga 45% acima do TGV convencional, a uma velocidade de serviço com máximo de 290 Km/h. (Thalys, 2009)

2.2.3.2. Alemanha

A Alemanha sempre esteve na vanguarda da mecânica, nomeadamente quando se fala de transportes. No entanto, devido a várias batalhas legais, apenas 10 anos depois da rede LGV estar construída em França que a ICE (InterCityExpress) foi criada.

Hoje a Alemanha possui comboios ICE de 3ª geração, que conseguem servir em certas linhas a velocidades concorrentes com qualquer comboio de alta velocidade.

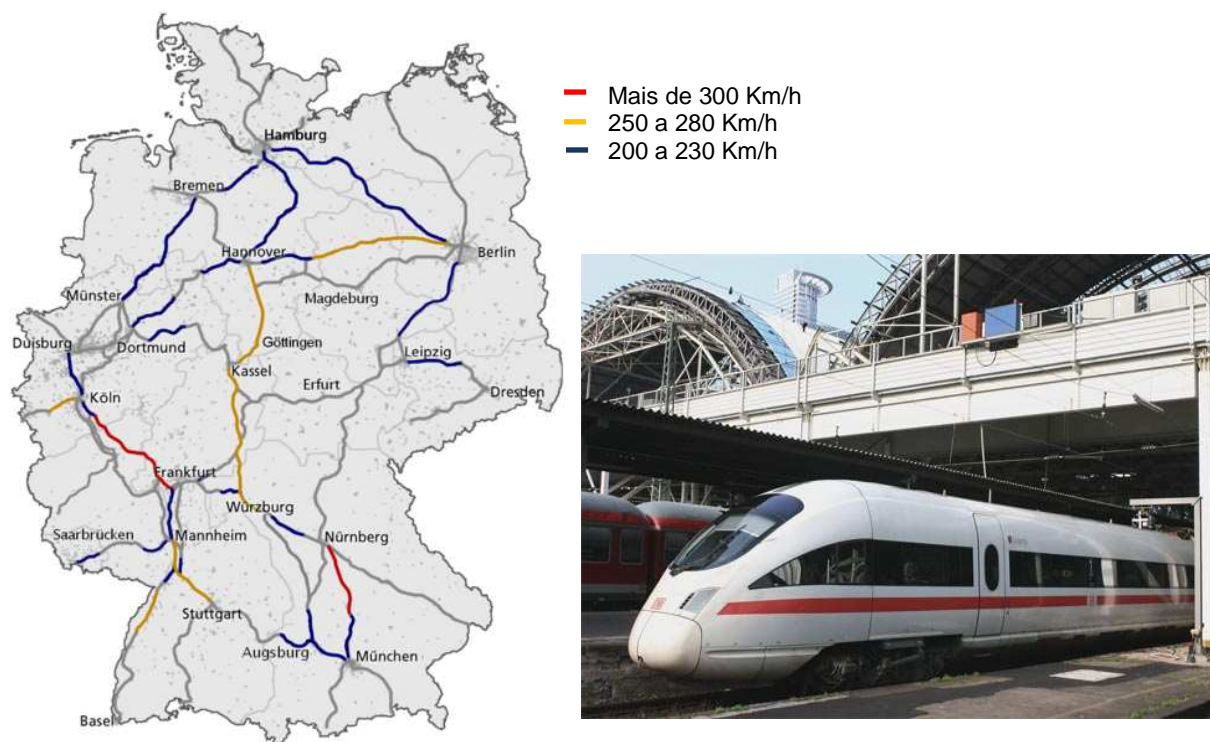


Fig. 10 – 3ª geração ICE e mapa rede ferroviária alemã (Deutsche Bahn, 2009)

As principais linhas onde é possível atingir velocidades acima dos 300 Km/h são a que liga Nuremberg a Munique e a de Frankfurt a Cologne. Estão ainda em fase de construção dois novos troços de velocidades acima dos 300 entre Nuremberg e Erfurt, e entre este último e Leipzig, que irão aumentar para quase o dobro os quilómetros de alta velocidade da rede ferroviária germânica. (Railway Technology, 2009)

Existe já, no entanto por toda a Alemanha uma vasta rede ferroviária de velocidades acima dos 200 Km/h, que a torna num dos países europeus mais avançados em termos ferroviários, sendo um dos principais inovadores e exportadores de tecnologia ferroviária.

2.2.3.3. Espanha

A Espanha é servida em termos de alta velocidade ferroviária pela AVE, Alta Velocidad Española. AVE terá mesmo a dupla conotação com o próprio animal, a ave, expresso no seu logotipo. Constitui hoje uma das maiores potências em termos de alta velocidade ferroviária e tem tendência a crescer de forma exponencial, sendo que já estará planeada uma enorme rede que cobrirá todo o país, ao mesmo tempo que integrará projectos de ligação com Portugal e França (Fig. 11).

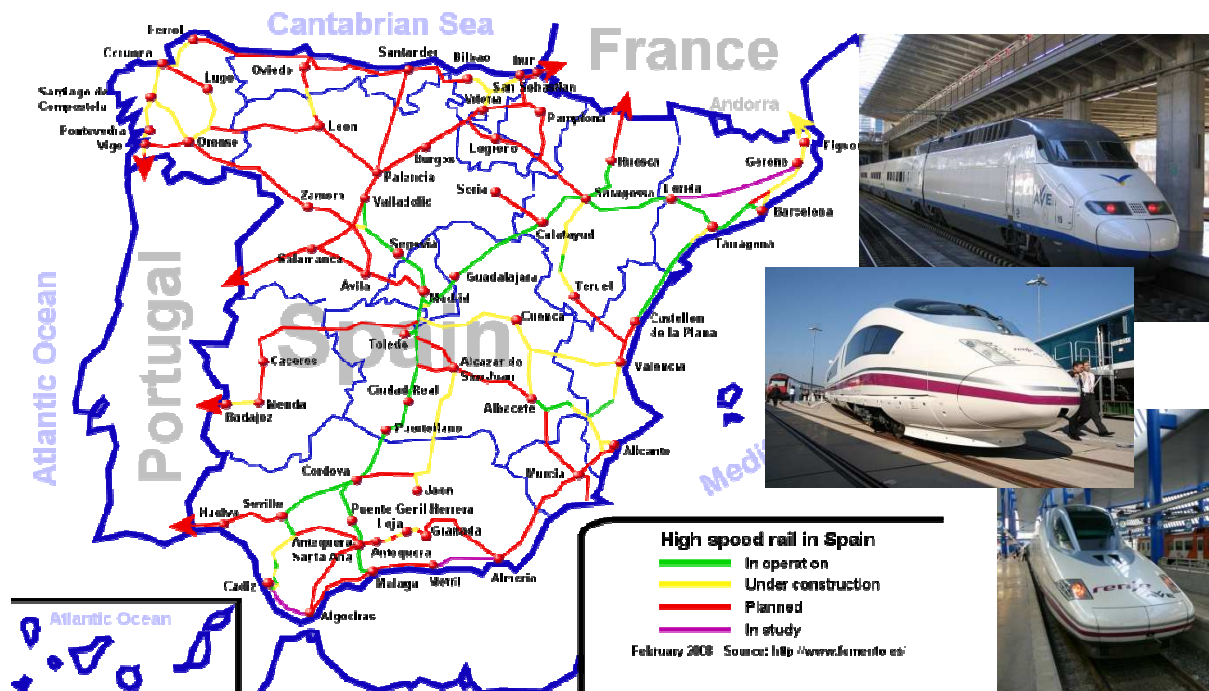


Fig. 11 - Alta Velocidade Espanhola (Fomento, 2008)

As locomotivas que actuam sob o nome da AVE são essencialmente de três tipos, e encontram-se apresentados na fig. 11. Enumerando-os de cima para baixo, eles são o série 100, serie 103, e série 102. (Renfe, 2009)

O série 100 é construído pela Alstom e serve a linha entre Madrid e Sevilha, a primeira linha de alta velocidade em Espanha, a qual entrou em serviço em 1992. O série 100 é constituído por 8 carruagens de passageiros e duas de tracção, e atinge velocidades máximas de serviço de 300 Km/h. (Renfe, 2009)

O série 102, por sua vez faz as ligações de Madrid-Málaga, Madrid-Valladolid e Madrid-Huesca. A sua constructora é a espanhola Talgo em associação com a Bombardier, e pode atingir velocidades de serviço na ordem dos 330 Km/h. (Renfe, 2009)

A ligação Madrid-Barcelona é feita pelo série 103, sendo que também serve entre Madrid e Sevilha e Madrid e Málaga. A sua velocidade máxima de serviço chega aos 350 Km/h e tem por base a tecnologia da Siemens. (Renfe, 2009)

1.2.3.4. Portugal

À ideia da criação de uma rede transeuropeia de alta velocidade ferroviária, que permita uma fácil e rápida troca de pessoas, bens e serviços entre diferentes estados, criou-se um fenómeno de corrida a esta tecnologia entre membros europeus, em que ninguém quer ficar de fora desta nova visão de

mercado. Portugal é um dos estados que não quer ficar de fora da alta velocidade europeia, pelo que já têm vindo a ser estudadas as várias possibilidades de construção das suas próprias linhas de alta velocidade.

Portugal possui já uma completa rede ferroviária (Fig.12), parte da qual recentemente reestruturada, que permite hoje em dia o alcance de velocidades consideráveis nos seus principais trechos.



Fig. 12 – Actual Rede Ferroviária Portuguesa (CP, 2009)

A ligação entre Faro e o Porto poderá ser feita através do Alfa Pendular, comboio tal que tem por base o italiano Pendolino ETR 480, e que chega a velocidade de serviço de 220 Km/h. Além destes comboios, que poderão desde logo serem classificados de alta velocidade, existem alguns intercidades modificados que poderão chegar até os 200 Km/h (CP, 2009).

Estas boas velocidades permitidas pela rede ferroviária portuguesa, aliadas à crise económica que o país tem vindo a ser alvo, são das principais razões que têm posto em causa a necessidade da construção das linhas de alta velocidade em território nacional. No entanto, o projecto da sua implementação tem vindo a ganhar cada vez mais claros contornos, e em Fevereiro de 2009, o governo português anunciou a aprovação de três linhas principais de alta velocidade (Fig.13): Madrid-Lisboa, Porto-Vigo, Porto-Lisboa.

A linha entre Madrid e Lisboa, permitirá a ligação dos 640 quilómetros (203 Km nacionais) entre as capitais ibéricas em 2h45. Este tempo extraordinariamente curto implicará velocidades máximas de serviço na ordem dos 350 Km/h e a sua construção avalia-se num investimento de cerca de 2,4 mil milhões de euros até à fronteira com Espanha. Espera-se que entre em serviço, como transporte de carga e passageiros, em meados de 2013 e que seja sujeito a uma procura de cerca de 9,4 milhões de

passageiros. É considerado pela UE um dos cinco projectos mais prioritários no espaço comunitário (RAVE, 2009).



Fig.13 – As Três Futuras Ligações Nacionais de Alta Velocidade (Rave, 2009)

A ligação entre Vigo e Porto em conjunto com a de Madrid-Lisboa são os projectos prioritários, que resulta da necessidade de integração de Portugal na rede transeuropeia de alta velocidade ferroviária. Assim, a data de entrada em serviço da primeira é, tal como na segunda, em meados de 2013, e consiste num investimento de cerca de 1,4 mil milhões de euros. Será também destinada a transportes mistos, e fará a ligação de 250 Km em 1 hora a velocidade de serviço máximas de cerca de 250 Km/h. Poderá significar um volume de procura de 3,7 milhões de passageiros (RAVE, 2009).

Por fim, a ligação Porto-Lisboa será feita numa outra fase, sendo que, caso corra como previsto, será construído até 2015 com um orçamento de 4,5 mil milhões de euros. A ligação de 292 Km entre as duas maiores cidades nacionais será feita a uma velocidade de serviço máxima de 300 Km/h, permitindo ser percorrida em 1 hora e 15 minutos. Este serviço será exclusivamente de transporte de passageiros, prevendo-se uma procura de 12,2 milhões (RAVE, 2009).

Além destas linhas já aprovadas, existe a hipótese em estudo de ligação de Braga a Salamanca, de Évora a Faro, e de Faro a Huelva.

2.3. MAGLEV: O FUTURO?

Em 1968, James Powel, um investigador americano da Brookhaven National Laboratory, preso nas estradas em plena hora de tráfico, pensou na ideia de utilização da levitação magnética para resolver o problema do tráfico. O conceito MagLev foi então desenvolvido. (Brookhaven National Laboratory, 2009)

O primeiro comboio maglev surge, no entanto, apenas em 1979 em Hamburgo, Alemanha. O denominado Transrapid 05 criou tamanho interesse, que a sua exposição na International Transportation Exhibition teve que ser prolongada por mais 3 meses que o previsto. Desde esse momento, vários trechos ferroviários experimentais utilizando a tecnologia maglev foram sendo implementados por todo o mundo, sendo que talvez o mais conhecido seja o JR-Maglev em Yamanashi, Japão.

A tecnologia baseia-se na criação de um campo magnético entre a linha e o comboio, criando o impulso necessário para que este seja suspenso em modo de levitação. Esta ideia traduz-se na não necessidade de rodas de contacto entre a linha e os carris, eliminando automaticamente a resistência

criada pelo atrito entre estes dois, potencializando em muito a força de propulsão do comboio. Este factor permite naturalmente o alcance de velocidades anteriormente inimagináveis para qualquer tipo de veículo terrestre.



Fig. 14 - JR-Maglev MLX01 (Japan Railway, 2009)

Várias versões do JR-Maglev têm vindo a ser desenvolvidas, sendo que o mais conhecido devido aos sucessos obtidos nos testes é o MLX01 (Fig. 13), que possui o actual recorde de alta velocidade ferroviária, registado nos 581 Km/h. O Japain Railway (JR) já anunciou em 2007 o plano para começar o serviço comercial do maglev entre Tóquio e Nagoya no ano de 2025.(Japan Railway, 2009)

Eliminada a força de atrito entre as rodas e os carris, a única resistência a vencer pelos maglev, é a resistência criada pelo ar. Existe já, no entanto, projectos de túnel em vácuo, onde passariam as linhas maglev, o que potencializava a sua impulsão a velocidades teoricamente ilimitáveis, ultrapassando na prática os 6,437 Km/h. Entre esses projectos, existe o da ligação transatlântica, em túnel a vácuo suspenso a determinadas profundidades no oceano, pela tecnologia maglev, o que permitiria a ligação entre Nova Iorque a Londres em cerca de um par de horas. (Hoffman, C., 2004)

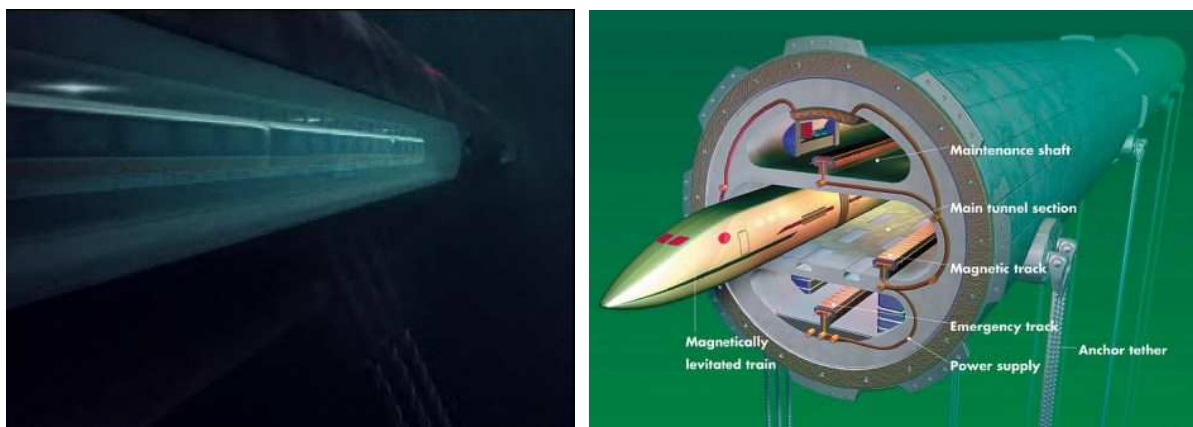


Fig. 15 – Hipotética Travessia Ferroviária Transatlântica em Vácuo. (Hoffman, C., 2004)

No entanto, estas idéias não passam apenas de meras visões revolucionárias. A necessidade de enormes quantidades de energia para produzir o campo magnético necessário, que permita a levitação do comboio, torna a aplicação prática desta tecnologia economicamente inviável. Esta fome de energia

seria, no entanto pequena quando comparada com a necessária para manter um túnel de longo comprimento totalmente em vácuo, pelo que actualmente esta ideia torna-se quase que absurda.

A história ensinou, porém a não subestimarmos o desenvolvimento da tecnologia, e os feitos que advêm dela. Hoje em dia desenvolvem-se já novas tecnologias com o objectivo de diminuir os gastos muito elevados de energia na criação do campo magnético do maglev, nomeadamente através do desenvolvimento de supercondutores, que são capazes da criação desse mesmo campo sem a utilização de energia, faltando apenas técnicas de aplicação a baixos custos de forma a serem postos em prática a larga escala. Assim estas idéias que apenas vagueiam nas cabeças dos visionários poderão de facto tornar-se o futuro da alta velocidade ferroviária, e de todo o sistema de transportes como o vemos hoje.

3

A PROBLEMÁTICA DO RUÍDO

3.1. INTRODUÇÃO

O som resulta da movimentação das partículas de um meio elástico, ou seja, é uma vibração acústica perceptível pelo aparelho auditivo por diferenças de pressão. Propaga-se em diversos meios sólidos, líquidos ou gasosos, variando de velocidade entre os mesmos. Essa variação da velocidade verifica-se também para diferentes temperaturas. Em termos gerais a velocidade de propagação no ar é de 340 m/s, na água de 1 500 m/s e no aço de 5 000 m/s. A sua grandeza física é a Pressão Sonora, que se exprime em decibel (dB). (FEDESPAB, 2003)

O Ruído por sua vez poderá ser definido como todo o som não desejado ou toda a energia acústica susceptível de alterar o bem-estar fisiológico ou psicológico das pessoas. (FEDESPAB, 2003)

A preocupação com o ruído tem vindo a crescer lado a lado com a mudança da mentalidade acerca da valorização da saúde e do bem estar e, por outro lado, com o crescimento exponencial dos meios urbanos e de todos os elementos que os constituem, em sintonia com um não tão correcto planeamento territorial, resultando em utilizações conflituosas de espaços comuns ou de zonas próximas.

A poluição sonora é considerada hoje um dos agentes mais agressivos à qualidade de vida dos seres humanos, e uma prova disso é que o ruído é o impacto ambiental do qual resultam mais queixas por parte das populações. Caso o mesmo não for tomado em conta e, devidamente controlada, será responsável por graves consequências na saúde e nas relações sociais das populações afectadas. (FEDESPAB, 2003)

Segundo o “Livro Verde para Futuras Políticas Relativas ao Ruído”, a Comissão Europeia estima que 20% da população europeia esteja diariamente exposta a níveis de pressão sonora inaceitáveis e, que o ruído ambiental tem um custo para a sociedade de, aproximadamente, 0,2 a 2% do PIB de cada Estado membro. As conclusões deste estudo são surpreendentes, e reflectem bem a magnitude da problemática da poluição sonora.

As consequências deste impacto ambiental vão desde a perda auditiva ou surdez permanente, às dores de cabeça, fadiga, gastrite, alergias, distúrbios cardiovasculares e hormonais, entre outras. Podem ainda traduzir-se em patologias comportamentais como é o caso da irritabilidade, ansiedade, desconforto, medo, tensão, stress e insónias. (FEDESPAB, 2003)

Evidentemente que tais consequências terão o seu peso na produtividade das populações, tornando-se desde logo um problema económico. Pessoas saudáveis trabalham mais e melhor, pelo que o custo da não prevenção poderá ser bem maior que o da tomada de medidas de mitigação.

As medidas de mitigação poderão ser feitas a 3 níveis: no planeamento, na fonte e entre a fonte e o receptor. No planeamento através do seu eficaz desenvolvimento, pensando cuidadosamente na utilização dos espaços urbanos e das artérias que os servem. Na fonte através da manutenção, utilização de altas tecnologias e aumento da eficácia dos mecanismos que produzem a poluição sonora. Por fim, entre a fonte e o receptor através de barreiras à propagação acústica. (UIC, 2008)

No âmbito deste trabalho será aprofundada em capítulo próprio, a terceira medida de mitigação das previamente enumeradas, especificamente na área das ferrovias de alta velocidade, sendo que não deixarão de ser dadas algumas indicações sobre as outras duas.

3.2. ENQUADRAMENTO LEGAL

3.2.1. DECRETOS IMPLEMENTADOS

Em 1987 surge o primeiro diploma legal com intenção de controlo de impacto sonoro, nomeadamente o denominado Regulamento Geral sobre Ruído (Decreto-Lei n.º251/87, de 24 de Junho, alterado pelo Decreto-Lei n.º292/89, de 2 de Setembro).

Este era ainda um diploma muito jovem, pouco ambicioso, pelo que seria de esperar que o mesmo fosse revisto num curto espaço de tempo, no entanto, foi somente em 2000 que se assistiu à alteração do diploma referente à poluição sonora, sendo criado o novo Regime Legal da Poluição Sonora (RLPS) ou Decreto-Lei n.º292/2000, de 14 de Novembro. Em 2002 são introduzidas novas alterações ao RLPS pelo Decreto-Lei n.º259/2002, nomeadamente o aumento da importância do papel dos municípios no controlo do ruído.

Actualmente os principais requisitos legais aplicáveis às actividades ruidosas são enquadrados nos seguintes diplomas legais:

- Decreto-Lei n.º 146/2006, de 31 de Julho, relativo à avaliação e gestão do ruído ambiente que transpõe para o direito nacional a Directiva comunitária 2002/49/CE
- Decreto-Lei n.º9/2007, de 17 de Janeiro, que revogou o Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro (RLPS), constituindo o novo Regulamento Geral do Ruído (RGR)

Em termos mais específicos acerca da circulação ferroviária, esta insere-se na descrição patente no artigo 3.º do actual RGR, como “actividade ruidosa permanente”, ou seja, é uma actividade desenvolvida com carácter permanente que produz ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou permaneça em locais onde se fazem sentir os efeitos dessa fonte. Tendo em conta esta classificação, aplica-se à circulação ferroviária o artigo 19.º do RGR, cujas especificações mais relevantes serão em seguida retratados. (REFER, 2008)

3.2.2. LIMITAÇÃO DO RUÍDO

O aspecto de maior interesse a ter em conta no Regime Legal da Poluição Sonora será a limitação de ruídos a ter em conta nas diversas zonas urbanas a ser respeitada por imposição legal.

Para perceber esses limites, há que ter primeiro a noção do significado de alguns indicadores de ruídos, que segundo o artigo 3.º do Decreto-Lei n.º9/2007, de 17 de Janeiro, se definem como o parâmetro físico-matemático que tenha uma relação com um efeito prejudicial.

No mesmo artigo são então definidos os seguintes indicadores de ruído:

- L_n – Denominado indicador de ruído noturno. É o indicador do ruído associado a perturbações do sono. É o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP 1730-1:1996, determinado durante uma série de períodos noturnos representativos de um ano;
- L_d – Denominado indicador de ruído diurno. Associado ao incómodo durante o período diurno. É o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP 1730-1:1996, determinado durante uma série de períodos diurnos representativos de um ano;
- L_e – Denominado indicador de ruído do entardecer. Associado ao incómodo durante o período do entardecer. É o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na Norma NP 1730-1:1996, determinado durante uma série de períodos do entardecer representativos de um ano.
- L_{den} – Denominado indicador de ruído diurno-entardecer-nocturno. Associado ao incómodo global (1).

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left[13 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right] \quad (1)$$

Os períodos de referência são definidos no artigo n.º3 do RGR como o intervalo de tempo a que se refere um indicador de ruído, de modo a abranger as actividades humanas típicas (Fig. 16).

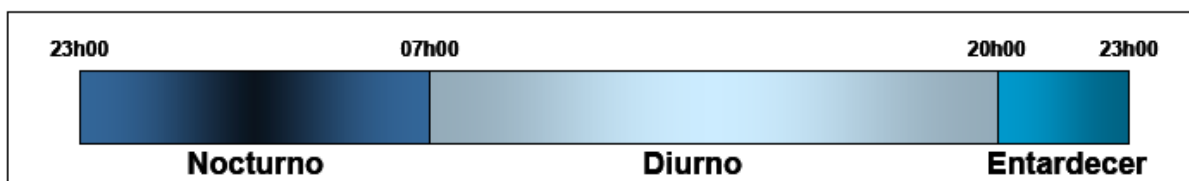


Fig. 16 – Classificação dos períodos de referências (REFER, 2008)

As infra-estruturas de transporte, que é onde se insere o âmbito deste trabalho, novas ou em exploração, estão sujeitas aos valores-limite fixados no artigo 11.º do Decreto-Lei n.º9/2007, de 17 de Janeiro (Quadro 2).

Quadro 2 – Limites impostos pelo RGR

Indicador	Zona Sensível	Zona Mista	Zona Sensível junto a Grande infra-estrutura de transporte ferroviário
L_n	45 dB	55 dB	55 dB
L_{den}	55 dB	65 dB	65 dB

Define-se zona sensível como a área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno.

Como zona mista define-se as zonas existentes ou previstas em instrumentos de planeamento territorial, cuja ocupação seja afectada a outras utilizações que não as referidas na definição de zona sensível, nomeadamente comércio, serviços e indústria.

Esses valores poderão, no entanto serem sujeitos a correcções em casos particulares indicados no regulamento.

3.2.3. OUTROS ASPECTOS LEGAIS

Segundo o disposto no n.º9 do artigo 19.º do RGR, para grandes infra-estruturas de transporte ferroviário (GIF), as entidades gestoras das mesmas deverão realizar Mapas de Ruído para fins de avaliação global da exposição ao ruído ambiente exterior, em determinada zona, devido a várias fontes de ruído ou do estabelecimento de previsões globais para essa zona.

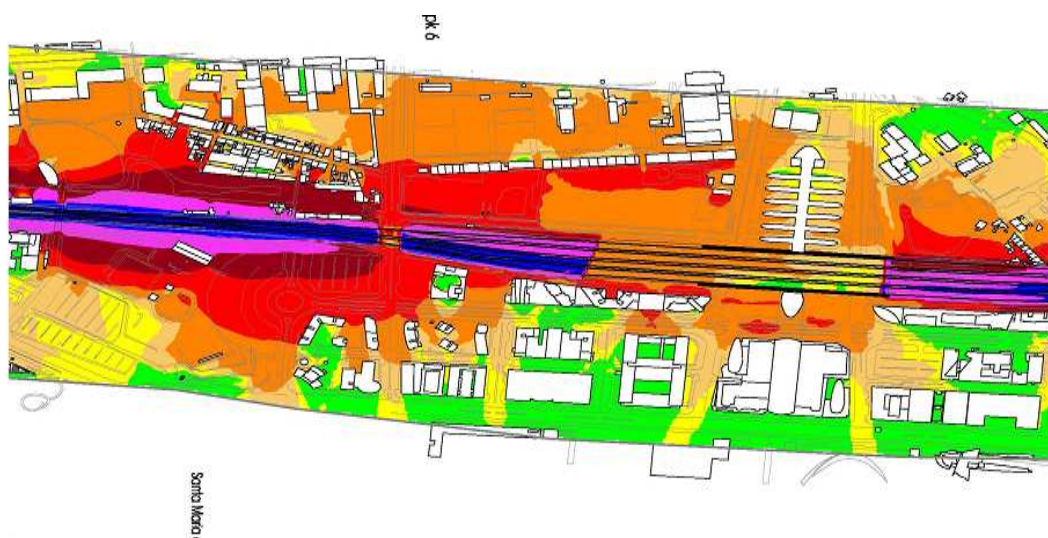


Fig. 17 – Exemplo de Mapa de Ruído no Cais do Oriente (REFER, 2008)

As previsões poderão ser feitas segundo vários modelos conforme a precisão desejada, apoiado por algum tipo de software apropriado. Os métodos que hoje em dia na Europa serão mais utilizados, em relação ao ruído viário e ferroviário, são:

- Método Francês;
- Método Britânico;
- Método Nórdico;
- Método Alemão.

Todos os métodos enunciados baseiam-se no entanto na análise das mesmas variáveis:

- Tráfego médio diário anual;
- Subdivisão do tráfego por classes (pelo menos, em ligeiros e pesados);
- Velocidade de circulação (por tipo de veículo);
- Repartição do tráfego por faixas de circulação (dependendo do método);
- Características do terreno envolvente (topografia, ocupação, absorção);
- Características da estrada (perfil longitudinal e perfil transversal).

Pela sua simplicidade e precisão aceitável, o método nórdico é muito utilizado em Portugal. Não será aqui exposta extensamente a sua aplicação, no entanto a previsão da intensidade sonora resultante do tráfego poderá ser calculada tendo por base a expressão (2). (FEUP, 2009)

$$LA_{eq, via} = L1 + \Delta L2 + \Delta L3 + \Delta L4 \quad (2)$$

Em que:

- $L1$ – Nível sonoro contínuo equivalente emitido pela circulação de todos os veículos na via;
- $\Delta L2$ – Correção para a distância;
- $\Delta L3$ – Correção devida à existência de barreiras, de reflexões e do tipo de solo;
- $\Delta L4$ – Correção para a inclinação da via.

A aprovação dos mapas de ruído compete à Agência Portuguesa do Ambiente (APA), que é também responsável por centralizar o conjunto destes no âmbito do Decreto-Lei n.º 146/2006, de 31 de Julho.

Com base nesses Mapas de Ruído, o Decreto-Lei n.º 146/2006, de 31 de julho, dá indicações acerca dos Planos de Redução de Ruído, de forma a diminuir o ruído ambiente, em especial quando os níveis de exposição sejam susceptíveis de provocar efeitos prejudiciais para a saúde humana. O Plano de Redução de Ruído é realizado pela entidade gestora da infra-estrutura, sujeito a aprovação da APA.

Segundo o artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 146/2006, todos os dados recolhidos pela APA deverão ser enviados à Comissão Europeia, bem como toda a listagem das entidades competentes para a elaboração, aprovação e recolha dos mapas estratégicos de ruído e dos planos de acção. Deverão ser enviados mapas de ruído ferroviário actualizados em cada 5 anos, para grande infra-estruturas ferroviárias com mais de 30 000 comboios por ano e aglomerados com mais de 100 000 habitantes. A data limite da primeira ronda de entrega dos planos de redução de ruído foi a 18 de Julho de 2008.

Segundo o mesmo artigo do parágrafo anterior, compete à APA fornecer ao público todas as informações acerca do ruído, suas consequências e medidas mitigatórias tomadas. No entanto, a entidade gestora da infra-estrutura, e nomeadamente as entidades responsáveis pela elaboração dos planos de acção, deverão promover a consulta dos mesmos, antes mesmo da sua aprovação, com o intuito participativo das populações afectadas. Os mesmos planos poderão também ser consultados nas câmaras municipais abrangidas por eles.

Este enquadramento legal nacional encontra-se em sintonia com a legislação europeia acerca da redução do ruído na Europa, que se iniciou primeiro com o *Green Paper (1996)*, e actualmente com o *Environmental Noise Directive (2002)* ou directiva europeia 2002//49/EC, que define os traços gerais que devem ser tomados em conta nas legislações de cada estado acerca do assunto.

3.3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

Como já foi dito, e falando em específico de fontes ferroviárias, de forma a ser diminuída a propagação do ruído que ultrapasse os limites legais impostos, e que poderá ser responsável pelos diversos problemas de saúde, sociais e económicos, já enumerados, poderão ser tomadas medidas interventivas a três níveis:

- No planeamento;
- Na fonte;
- Entre a fonte e o receptor.

3.3.1. NO PLANEAMENTO

O planeamento é o primeiro nível de intervenção para prevenção de situações problemáticas associadas à propagação do ruído.

Poderemos falar do planeamento ao nível territorial, mas também ao planeamento relacionado com o projecto dos elementos que constituem os outros dois níveis de mitigação da lista atrás referida.

Ao nível territorial dever-se-á, em primeiro lugar, ter o bom senso no planeamento do traçado longitudinal das próprias linhas ferroviárias. Este deverá desviar-se das zonas habitacionais, tendo em especial atenção as mais sensíveis. Deverá ainda ter-se cuidado com a decisão dos raios de curvatura da linha e das velocidades de serviço projectadas, sendo que a diminuição dos raios e o aumento das velocidades de serviço são responsáveis pelo aumento do ruído. (Environmental Noise Directive, 2008)

Estas considerações são nulas para as linhas já em utilização. No entanto, através do maneuseamento dos planos directores municipais, é possível gerir de forma mais eficaz os conflitos de espaços. Tendo tal em conta, seria naturalmente de evitar construções típicas de zonas sensíveis em proximidade com as fontes ferroviárias de ruído já existentes. Outra solução para a redução do ruído em linhas já existentes passaria pela também redução da velocidade de circulação dos comboios, ou então, sendo menos eficaz, a diminuição do número de passagens de comboios.

Como já foi dito, existem também vantagens na prevenção no planeamento dos mecanismos de diminuição do ruído, quer a nível da fonte, quer a entre a fonte e o receptor, desde logo na fase de projecto dos mesmos. O custo da não prevenção poderá em muitos casos ser maior que o custo da prevenção na fase de projecto. Pelo que a cuidada escolha de mecanismos mais eficientes, e de tecnologias mais recentes, apesar de aumentar os custos de construção, certamente diminuirá os custos de novas intervenções mitigadoras, provavelmente mais caras e complexas, após a construção do projecto, de forma a serem respeitadas as indicações legais.

3.3.2. NA FONTE

No caso das linhas ferroviárias, nomeadamente as linhas de alta velocidade (LAV), a fonte de ruído será, obviamente, a passagem das locomotivas ao longo das mesmas. No entanto, o primeiro passo para perceber como actuar com o intuito de proceder à diminuição do ruído produzido, é perceber o que gera o ruído nessas mesmas locomotivas.

O ruído propagado pelos comboios tem origem, em condições normais, fundamentalmente de três fontes:

- Contacto entre comboio e os carris;
- Pressão aerodinâmica;
- Equipamentos de criação de tracção.

É de referir que existem muitas outras fontes de ruído, nomeadamente sistemas de ventilação, sinalização e alimentação eléctrica. No entanto, estas quando comparadas com as atrás referidas não se tornam significativas.

A quantidade de ruído produzido por cada uma das 3 fontes anteriormente enumeradas depende, entre vários factores, da velocidade a que se desloca o comboio. A taxa de variação do ruído com a velocidade, taxa essa sempre positiva, é, no entanto, diferente nas 3 fontes.

A taxa de crescimento do ruído do motor com a velocidade será menor que a taxa de crescimento do ruído do contacto entre a roda e o carril. Esta por sua vez será também menor à verificada no ruído aerodinâmico como se verifica na Fig. 18.

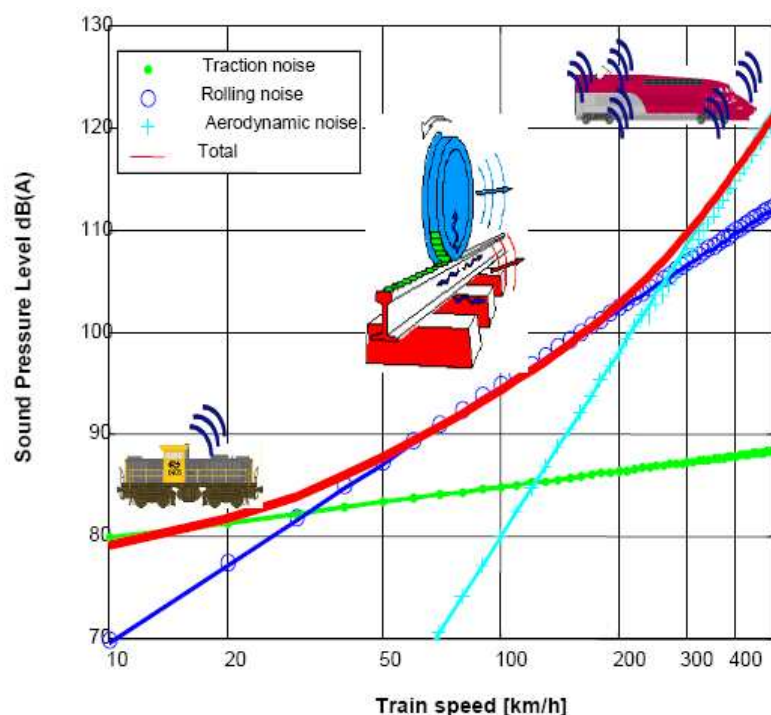


Fig. 18 – Fontes de Ruído nas linhas ferroviárias (UCI, 2008)

Assim, verifica-se que para baixas velocidades a principal fonte de ruído será o trabalhar dos motores de impulsão à locomotiva. Para médias velocidades, o contacto entre as rodas e os carris será o aspecto mais problemático. Enquanto que para altas velocidades, as elevadas pressões aerodinâmicas causadas por elas, serão preponderantes na criação de ruído, ruído esse muito elevado.

3.3.2.1. Equipamentos de Criação de Tracção

Aqui o ruído poderá ter origem em diferentes fontes, desde o motor até à transmissão e mecanismos de ventilação.

O problema de ruído neste caso será mais problemático em motores a diesel do que a motores eléctricos. Esse será um dos motivos do desaparecimento progressivo dos motores a diesel, aliado à diminuição de outros impactos ambientais, bem como os ganhos económicos que daí advêm.

As soluções neste caso não serão muitas. A medida a tomar será a utilização de locomotivas mais silenciosas, ou a modificação dos elementos do motor, utilizado melhores tecnologias e mecanismos mais eficazes.

3.3.2.2. Contacto entre Comboio e Carris

O ruído criado pelo atrito entre as rodas do comboio e os carris, devem ser separados e tratados de forma diferente. O ruído resultante da vibração das rodas terá frequências diferentes das dos carris, e para velocidades mais elevadas será dominante em relação estes.

As medidas de mitigação poderão ser fundamentalmente duas. Em primeiro lugar a diminuição do atrito entre o aço da roda e o aço dos carris, pelo que, linhas e rodas com menor rugosidade emitirão

naturalmente menos ruído, tendo em consideração que tal terá consequências nos sistemas de travagem. Em segundo lugar, é possível a instalação de um sistema de amortecimento (Fig. 19) nas linhas, *Rail Dampers*, e nas rodas, *Wheel Dampers*, que amortecem as vibrações causadas pelo atrito e dessa forma diminuem o ruído.

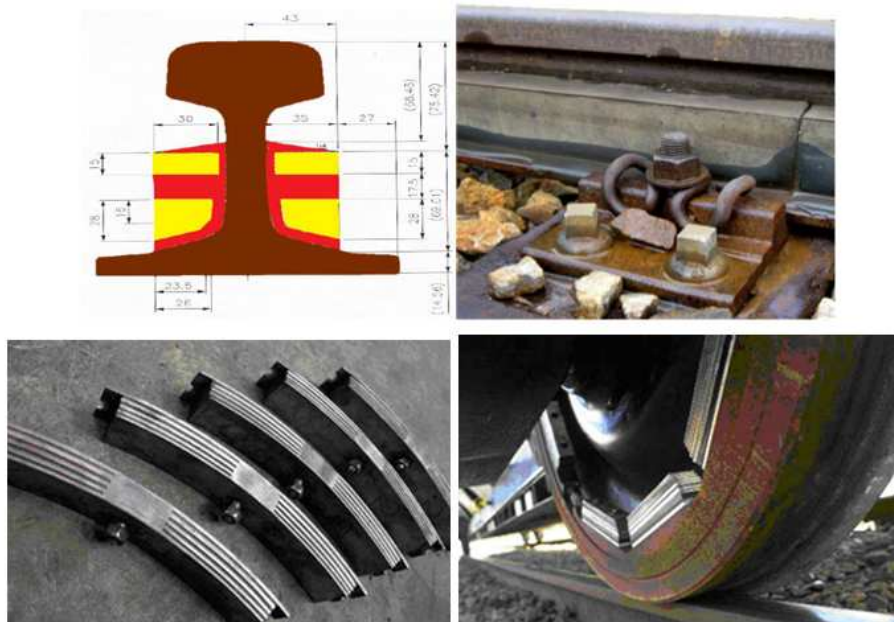


Fig. 19 – Rail Dampers em cima e Wheel Dampers em baixo (Environmental Noise Directive, 2008)

Esta última solução tem sido cada vez mais aceite na comunidade internacional, e estudos como o *EU Project Silent Track*, comprovam o sucesso da sua utilização. Esses estudos concluíram que os *Rail Dampers* poderão representar uma redução de cerca de 7 decibéis ao ruído produzido pela linhas, e 3 a 4 decibéis do ruído total de rolamento. (Environmental Noise Directive, 2008)

Os *Wheel Dampers* funcionam da mesma forma, mas desta vez em relação às rodas, e a redução de ruído é equivalente à da linhas.

A decisão entre um ou outro resulta da conclusão acerca o qual emite mais ruído. Caso não se consiga chegar a essa conclusão, dever-se-á usar os dois sistemas.

A utilização destes sistemas traduz-se em ganhos económicos significativos, visto os mesmos permitirem uma redução da altura, e da eficiência das barreiras sonoras, tornando a sua implantação bem mais barata.

3.3.2.3. Pressão Aerodinâmica

A diminuição do ruído resultante da pressão aerodinâmica passará apenas pelo melhoramento do design das locomotivas, algo que se tornou fundamental nos novos veículos ferroviários de alta velocidade. A diminuição do atrito do ar é sinónimo não só da diminuição do ruído, mas também do aumento da capacidade de velocidade, pelo que se poderá aqui entrar num paradoxo.

Não esquecer ainda que o design aerodinâmico dos elementos que se encontram próximas da via poderão também eles contribuir para a diminuição ou aumento do ruído resultante da movimentação do ar.

3.3.3. ENTRE A FONTE E O RECEPTOR

Entre a fonte e o receptor, a intervenção resume-se à construção de obstáculos ao ruído, impedindo a sua propagação até ao receptor, sendo este salvaguardado das possíveis consequências. Estes obstáculos podem ser criados, por um lado, pela correcta construção de edifícios com capacidade de isolamento acústico apropriada à sua utilização, ou por sua vez com o isolamento das fontes de ruído (p.e. vias ferroviárias) através da utilização, sempre que viável, de túneis, e da construção das barreiras sonoras.

O isolamento acústico dos edifícios deve, obviamente, ser apropriado à função dos mesmos, bem como ao contexto territorial que se encontram. É conseguido com a utilização de correctos materiais, disposições construtivas, formas e texturas das paredes e elementos exteriores dos edifícios. Materiais absorventes, caixas de ar, vidros duplos, formas rugosas ou onduladas, caixilhos bem isolados, são exemplos de boas práticas com a finalidade de se obter bons isolamentos acústicos.

Os túneis são extremamente eficazes na redução do ruído em vias de comunicação, nomeadamente ferroviárias. São também, no entanto, uma solução pouco viável, consequência dos elevados custos da sua construção e manutenção, pelo que apenas em específicos casos será justificado o seu uso.

As barreiras sonoras, por sua vez, sendo objecto de estudo principal do presente trabalho, serão aprofundadas em capítulo próprio.

3.3.4. MANUTENÇÃO

Um dos aspectos em relação às medidas de mitigação do impacto do ruído, que apesar de relevante importância é muitas vezes desvalorizada e mesmo ignorada, é a correcta manutenção dos mecanismos que garantam essa mesma mitigação. A falta de manutenção das rodas, dos carris, dos mecanismos de criação de tracção e de todos os outros mecanismos que fazem o comboio funcionar, pode provocar o aumento de ruído em significativos decibéis, que poderá por sua vez ser suficiente ao não cumprimento das normas em vigor, invalidando todas as medidas até aí tomadas para as cumprir.

A manutenção deve também ser exercida sobre os obstáculos à propagação do ruído, sendo que a degradação dos mesmos diminuirão a eficiência e protecção para que foram dimensionados.

4

BARREIRAS SONORAS**4.1. INTRODUÇÃO**

As barreiras sonoras, também denominadas de barreiras acústicas, são dos métodos mais utilizados de mitigação do impacto causado pela poluição sonora nas vias de comunicação, quer rodoviária quer ferroviária. Esse elevado uso das barreiras sonoras, desde o seu aparecimento na Califórnia, Estados Unidos, em 1968 (Walker, J. et al, 2006), traduziu-se num crescente desenvolvimento caracterizado pela divergência em técnicas, formas e materiais, de forma a que, entre outros factores, a eficácia e a economia das mesmas se tornassem cada vez maiores.

Define-se barreira sonora como sendo qualquer infra-estrutura criada com o objectivo de formar um obstáculo físico à propagação das ondas sonoras, entre uma fonte e um receptor. No entanto, da mesma forma que são um obstáculo ao som, são-no também à vista, e este é hoje em dia uma das mais discutidas desvantagens das barreiras sonoras, e um dos principais factores que põem em causa a sua utilização.

Outras desvantagens estão também associadas à implementação das barreiras sonoras. É exemplo a divisão de espaços por elas criada, seja de aglomerados urbanos, seja de ecossistemas naturais. As barreiras são também responsáveis pela criação de zonas de sombra que poderão ter efeitos negativos em zonas residenciais demasiadamente próximas destas. Por fim, considera-se que este tipo de medida mitigadora torna-se muito dispendiosa, sendo que será vantajoso analisar-se primeiro a possibilidade de aplicação de medidas alternativas para reduzir o ruído, antes da decisão de implementação de barreiras sonoras.

No entanto, a atenuação sonora não é a única vantagem inerente à implementação de barreiras. Estas poderão, por exemplo, também actuar como protecção das zonas residenciais, em relação aos agressores resultantes da actividade viária, nomeadamente propagação directa de gases poluentes, sujidades e poeiras, bem como a ocorrência de acidentes e despistes. A vedação das vias de comunicação ao público e a animais, criada pelas barreiras é outro aspecto positivo da sua implementação.

As barreiras sonoras, apesar de associadas maioritariamente a vias de comunicação, poderão, no entanto, ser também utilizadas como medida de mitigação das mais variáveis fontes de poluição sonora. São já intensamente usadas em obras de construção civil, responsáveis pela criação de grandes fontes de ruído em meios urbanos e em isolamento de equipamento mecânico em vários ramos industriais. A tecnologia de barreiras sonoras é também muito utilizada em vedações de terrenos de moradias particulares, nomeadamente em grande aglomerados urbanos, ou em zonas de grande proximidade a importantes vias de transporte.

No âmbito deste trabalho, será aprofundado o estudo das barreiras sonoras das vias de comunicação em geral, e das ferrovias em particular. No presente capítulo far-se-á um levantamento das soluções existentes e das suas particularidades, nomeadamente em relação às diferentes vantagens e limitações. Pretende-se ainda o esclarecimento da forma física de como as barreiras actuam, bem como a análise da sua eficácia real e da relação benefício/custo inerente à sua construção. Por fim, pretende-se dar algumas luzes sobre o futuro da construção de barreiras sonoras, enumerando algumas idéias e tecnologias inovadoras que têm vindo a ser implementadas, com o objectivo de as tornar mais eficientes e ao mesmo tempo atenuar as actuais desvantagens inerentes à sua utilização.

Esta análise torna-se essencial nos dias de hoje, considerando que este método de mitigação assume relevante importância na salvaguarda da qualidade de vida dos aglomerados urbanos cada vez mais ruidosos, como resultado da crescente sobrelotação e do desenvolvimento económico e tecnológico que se tem vindo a verificar.

4.2. PRINCÍPIOS TEÓRICOS ACERCA DO FUNCIONAMENTO DAS BARREIRAS SONORAS

Como já foi dito, as barreiras sonoras têm como objectivo a criação de um obstáculo à propagação das ondas sonoras, entre a fonte e o receptor. Este obstáculo resulta por um lado na absorção de parte, ou na reflexão, das ondas sonoras de linha directa entre a fonte e o receptor e, por outro lado, no aumento da distância da propagação difractada que atinge o receptor, diminuindo desta forma a pressão sonora e, portanto, o ruído.

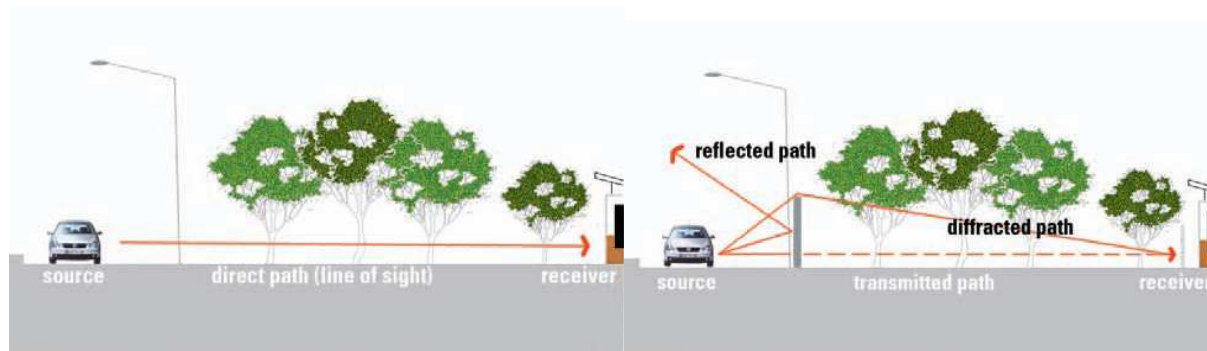


Fig. 20 – Desenho esquemático do funcionamento das Barreiras Sonoras (Walker, J. et al, 2007)

Assim, e de forma simplificada, o som resultante da fonte viária, quando entra em contacto com a barreira, ou é absorvido pela mesma ou reflectida a ângulo igual ou refractado, conforme a densidade do material e da textura de superfície.

As ondas sonoras que, por sua vez, ultrapassem o topo da barreira são sujeitas ao fenómeno de refacção fazendo-se sentir no receptor. Este fenómeno é característico de qualquer tipo de propagação de ondas, tal como a luz e as ondas de água. No entanto essa refacção das ondas sonoras não é uniforme em termos de frequências, sendo que as frequências mais elevadas são refractadas a menor ângulo, enquanto que por sua vez, as baixas frequências são refractadas para o interior da zona de sombra da barreira (Fig 21).

Conclui-se então que as barreiras sonoras serão naturalmente menos eficazes na redução de baixas frequências. Assim, e sendo o ruído criado pelas vias ferroviárias de menor frequência em comparação com as vias rodoviárias, a eficácia deste método de mitigação em ferrovias, âmbito do presente trabalho, será também menor.

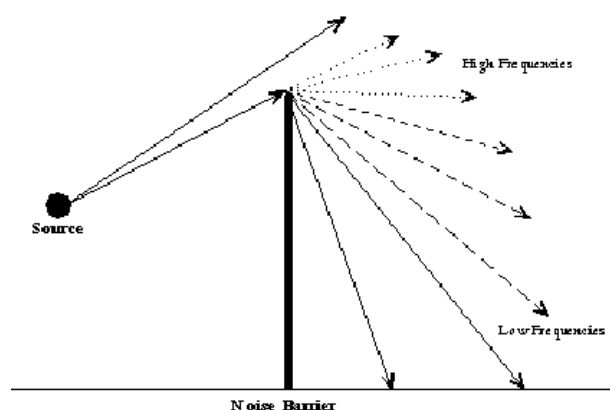


Fig. 21 – Fenómeno de Refracção (Fleming, G. et al, 2000)

Tendo isto em consideração a *UIC- Internacional Union of Railways* aconselha a ser feito, em primeiro lugar, uma análise de possíveis métodos de redução sonora a aplicar na fonte, e só depois passar ao estudo da aplicação de barreiras sonoras, pois esta última solução não se tem verificado economicamente eficaz.

4.2.1. ABSORÇÃO VS REFLEXÃO

Existem, portanto, barreiras que absorvem parte significativa da energia sonora, denominadas de barreiras de absorção, e as que reflectem as ondas de propagação sonora a que se dá o nome de barreiras reflectoras. Esta capacidade de absorver ou reflectir o som está latente nas propriedades dos materiais (quadro 3) utilizados na barreira, nomeadamente da densidade.

Quadro 3 – Espessura, Densidade e Perda na Transmissão de diferentes materiais (HK Government, 2003)

Material	Espessura mm	Densidade de Superfície Kg/m ²	Transmission Loss (TL) dB
Polycarbonato	8 – 12	10 – 14	30 – 33
Acrílico	15	18	32
Blocos de Betão Leve	200	151	34
Betão Denso	100	244	40
Betão Leve	150	244	39
Betão Leve	100	161	36
Tijolo	150	288	40
Aço, 18 ga	1.27	9.8	25
Aço, 20 ga	0.95	7.3	22
Aço, 22 ga	0.79	6.1	20
Aço, 24 ga	0.64	4.9	18
Folha de Alumínio	1.59	4.4	23
Folha de Alumínio	3.18	8.8	25
Folha de Alumínio	6.35	17.1	27
Madeira	25	18	21
Contraplacado	13	8.3	20
Contraplacado	25	16.1	23

Poder-se-á ainda falar de um terceiro grupo denominado de barreiras dissipadoras que, na prática, funcionarão como reflectoras, mas que, como o próprio nome indica, utilizam determinado tipo de superfície para dissipar as ondas sonoras.

A escolha entre barreiras absorventes e reflectoras baseia-se na análise das características muito próprias que as distingue e do local em que se irão inserir.

As barreiras reflectoras têm como principal vantagem a maior estabilidade e resistência que resulta de maiores densidades e, portanto, maiores massas dos materiais aplicados. Outra grande vantagem está na possível utilização de materiais transparentes, nomeadamente o acrílico, muito utilizado com o intuito de diminuir a tão problemática questão de impacto visual causado pela construção das barreiras.

No entanto, as barreiras reflectoras são responsáveis por determinados fenómenos que devem ser cuidadosamente analisados.

Sendo que as mesmas não diminuem de facto o ruído, apenas desviam o sentido da sua propagação do receptor, dever-se-á saber exactamente as novas direcções de propagação, assegurando-se que outro receptor sensível não seja afectado.

Outro fenómeno a evitar resulta da utilização de barreiras reflectoras em paralelo. Este tipo de solução, que utiliza barreiras sonoras em cada lado da via, poderá formar um “canhão de som” ressonando com o som reflectido de e entre cada parede (Fig. 22). Isto poderá traduzir-se num aumento considerável do ruído, pondo em causa o correcto funcionamento da barreira (Sound Fighter, 2009).

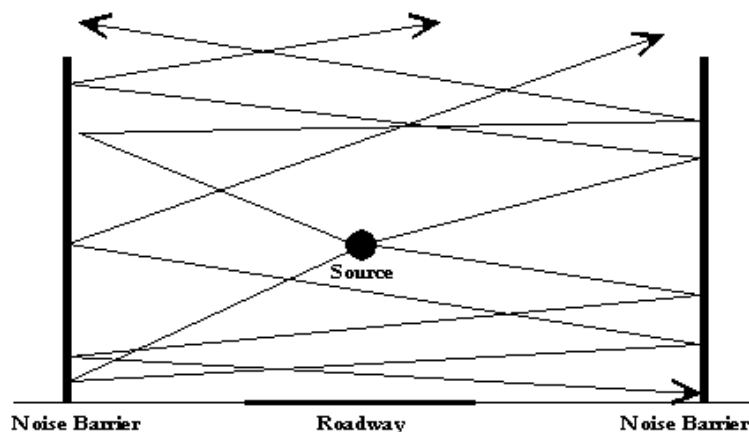


Fig. 22 – Utilização de Barreiras Reflectoras Paralelas (Fleming , G. et al, 2001)

Existem outros aspectos a serem tomados em conta, tendo em consideração as características reflectoras de alguns materiais. Imagine-se a construção de uma barreira sonora entre uma zona residencial e um armazém como representado na Fig. 23. Seria de supor que uma barreira sonora reflectora, devidamente dimensionada, do lado da zona residencial seria satisfatório visto o som reflectido nesta afectar apenas a zona do armazém. No entanto, não se deve esquecer que o armazém, sendo provavelmente revestido de material reflector, criará o fenómeno descrito no parágrafo anterior.

São então já evidentes as vantagens da utilização das barreiras de absorção sonora, que procedendo à absorção de parte da energia sonora, permitem mais seguras previsões do comportamento do campo acústico criado pela fonte e a barreira, garantindo com mais segurança a correcta protecção do receptor, contra o ruído.

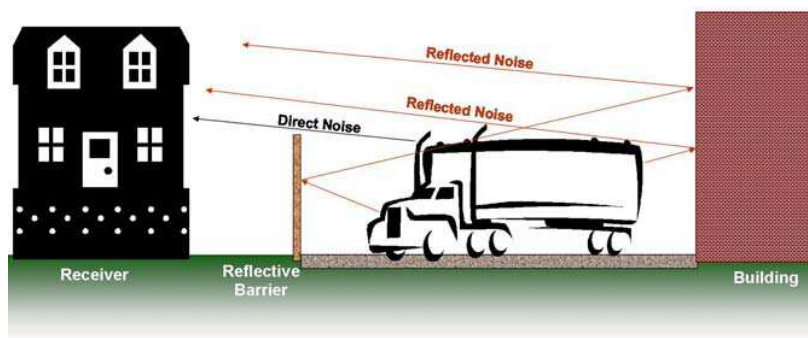


Fig. 23 – Combinação entre Barreiras Reflectoras e Edifícios Comerciais (Sound Fighter, 2009)

Tomando o exemplo anterior, bastaria a colocação de um revestimento absorvente no exterior do armazém (Fig. 24) para evitar os fenómenos de ressonância sonora, e desta forma proteger correctamente a zona habitacional. As ondas que reflectissem na barreira sonora seriam absorvidas nesse mesmo revestimento do edifício, pelo que não seriam reflectidas novamente para a barreira nem para a zona protegida.

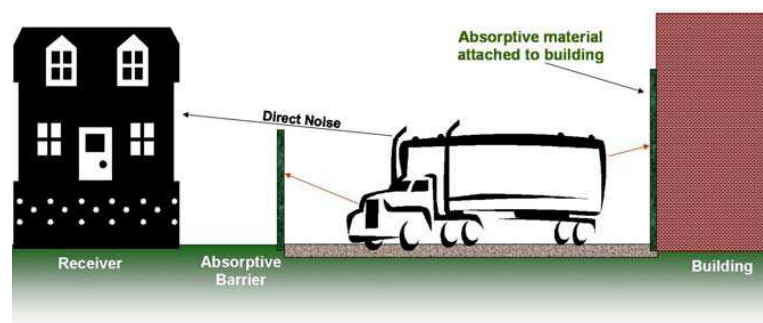


Fig. 24 – Protecção Sonora das Zonas Habitacionais junto a Edifícios Comerciais (Sound Fighter, 2009)

As barreiras de absorção têm, no entanto a desvantagem de recorrerem a materiais como, por exemplo, lã de rocha ou fibra de vidro, que não possuem sequer resistência de sustentação, pelo que à sua utilização terá sempre de ser associada a aplicação de uma estrutura que os suporte, como, por exemplo, é o caso dos painéis de caixões metálicos. Isto poderá tornar a sua construção mais complexa e morosa, não significando necessariamente que as torne mais caras. O seu comportamento mecânico é também mais difícil de prever, sendo que geralmente é mais fraco devido à utilização de materiais não tão resistentes.

Os materiais escolhidos para a construção das barreiras sonoras de absorção serão satisfatórios desde que garantam uma redução sonora suficiente para que a diferença entre o som no topo da barreira e a atravessada pela mesma seja superior a 10 dB. Isto deve-se ao facto que, devido à intensidade sonora se encontrar em escala logarítmica, quando existe uma diferença maior do que 10 dB entre duas fontes sonoras, a intensidade sonora resultante será menos de 0,5 dB maior que a maior das intensidades sonoras das duas fontes. Isto é, imaginando-se uma fonte sonora A de 70 dB, por exemplo, no topo da barreira, e outra B de 60dB, por exemplo, transmitida pela barreira, a intensidade sonora resultante seria de 70,4 dB (3), pelo que o som transmitido através da barreira terá um peso no ruído final de cerca de 0,4 dB, tornado-se quase que desprezável. (HK Government, 2003)

$$L_{A+B} = 10 \times \log_{10} \left[\log_{10}^{-1} \frac{70}{10} + \log_{10}^{-1} \frac{60}{10} \right] = 70,4 \text{ dB} \quad (3)$$

4.2.2. DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO

O dimensionamento geométrico da barreira estará obviamente relacionado com a atenuação sonora a que se propõe e consiste no cálculo da altura necessária para o efeito, tendo em consideração que o isolamento sonoro proporcionado pela barreira é satisfatório.

Relembrando a fórmula de medição do ruído (2), descrita no capítulo anterior, tenha-se em atenção o coeficiente ΔL_3 (4), que, como descrito, corresponde à correcção devida à existência de barreiras, reflexões e tipo do solo.

$$\Delta L_3 = \Delta L_s + \Delta L_m \quad (4)$$

O ΔL_s corresponderá então à correcção devida à atenuação proporcionada pela existência de obstáculos entre a estrada e o receptor, enquanto o ΔL_m será a correcção devida à absorção proporcionada pelo tipo de solo.

Assim, conhecendo a intensidade sonora que se pretenderá obter $L_{Aeq,via}$ (2) e todos os outros factores que influenciem a ponderação da mesma, conhece-se também o valor que deverá ter o ΔL_s , a partir do qual se calcula a altura necessária da barreira sonora (Fig. 25).

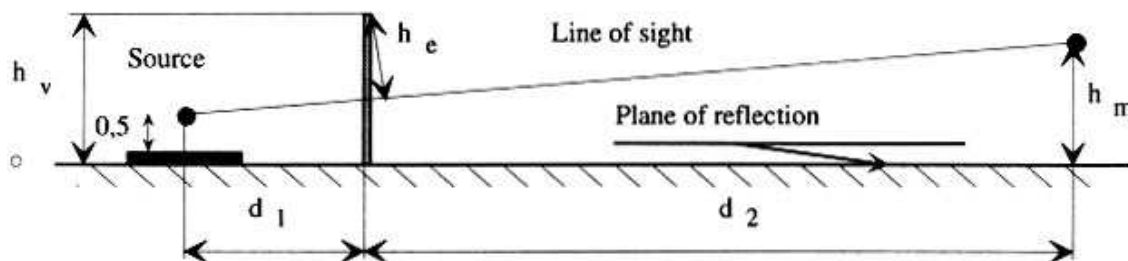


Fig. 25 – Esquema para o cálculo da altura da barreira sonora (FEUP, 2009)

$$h_e = \frac{(h_v - h_m)d_1 + (h_v - h_b - 0.5)d_2}{\sqrt{(d_1 + d_2)^2 + (h_m - h_b - 0.5)^2}} \quad (5)$$

$$x = 1.1h_e \sqrt{\frac{d_2 + d_1}{d_1 \times d_2}} \quad (6)$$

Em que:

- Se $d_2 \geq d_1$ e $d_2 < 30$, considerar $d_2 = 30$ e se $d_2 \geq d_1$ e $d_2/d_1 > 20$, considerar $d_1 = 0.05 d_2$;
- Se $d_2 < d_1$ e $d_1 < 30$, considerar $d_1 = 30$ Se $d_2 < d_1$ e $d_2/d_1 > 20$, considerar $d_2 = 0.05 d_1$.

O ΔL_s estará então directamente relacionado com o valor de x , através das seguintes condições:

- se $x \geq 2.4$ $\Rightarrow \Delta L_s = -25$;
- se $0 \leq x < 2.4$ $\Rightarrow \Delta L_s = -5 - 10 \log [1 + x + 17 x^2]$;

- se $-0.33 \leq x < 0 \Rightarrow \Delta L_s = -5 + 10 \log [1 - x + 17 x^2]$;
- se $x < -0.33 \Rightarrow \Delta L_s = 0$.

Ou seja, de uma forma resumida, conhecendo-se o valor necessário de ΔL_s para se obter determinado valor desejado de LA_{eq} , via, calcula-se o intervalo de x tendo em consideração as condições apresentadas no parágrafo anterior. A partir do x obtém-se o h_e (6), que finalmente permite obter o h_v (5), que corresponde ao valor da altura que a barreira deverá ter.

Será ainda necessária a análise da capacidade reflectora do solo para se poder proceder a um correcto dimensionamento da altura da barreira, mas, fugindo ao âmbito do trabalho, tal aspecto não será aqui desenvolvido.

4.3. PROCESSO DE ESCOLHA DO TIPO DE BARREIRA SONORA

Como já foi dito, de há anos para cá, se tem assistido a diferentes desenvolvimentos das tecnologias utilizadas nas barreiras sonoras. Como consequência existem hoje um enorme leque de soluções aplicadas, assim o primeiro passo na implementação de barreiras sonoras, será a correcta escolha do tipo de barreira a utilizar. Tal escolha terá de ter em conta, entre outros, os seguintes factores:

- Redução sonora a que se propõe;
- Altura e extensão requeridas;
- Condições climáticas;
- Topografia do local;
- Contexto territorial e social;
- Viabilidades económicas.

A redução sonora pretendida estará obviamente ligada à escolha do tipo de barreira a usar, sabendo que, como já foi referido, os vários materiais utilizados terão desempenhos diferentes na capacidade isoladora da barreira. A análise da frequência do ruído a atenuar é fundamental na escolha do material, visto que diferentes materiais têm desempenhos diferentes a diferentes frequências, pelo que uma barreira que seja utilizada eficazmente na redução sonora de uma auto-estrada poderá não o ser numa via ferroviária que crie igual intensidade de ruído, como consequência de esta última ser caracterizada por frequências mais reduzidas.

A altura e extensão da barreira interferem com a escolha tendo em conta que para barreiras maiores, principalmente em extensão, será certamente mais viável a utilização de soluções mais simples e baratas, de preferências com uma elevada taxa de pré-fabricação, de forma a tornar a sua instalação mais rápida, e assim diminuir custos inerentes à necessidade a longo prazo de elevadas quantidades de mão de obra.

As condições climáticas terão também um papel fundamental na escolha, pois a solução a adoptar deverá ter as características resistentes adequadas para permitir uma aceitável durabilidade nessas mesmas condições, que em certos casos poderão ser muito exigentes. As cargas criadas pelo vento, as temperaturas, a criação de gelo, e as cargas que daí advêm, a humidade e a intensidade luminosa a que a barreira será exposta na sua vida útil são factores cuja análise deverá ser feita com todo o cuidado na escolha da solução a utilizar.

As cotas topográficas ao longo da linha de implementação das barreiras é um processo que antecede sempre o projecto destas. No caso em que se tratará de um terreno muito acidentado a escolha pelo tipo de barreiras mais flexíveis, com processos de construção mais simples, torna-se vantajoso. A utilização, por exemplo, de painéis constituídos por vários subpainéis será uma boa solução neste caso,

visto poder-se jogar com a utilização de mais ou menos subpainéis, de forma a ultrapassar as dificuldades topográficas de forma simples e eficaz.

O impacto visual seria das menores preocupações quando as primeiras barreiras sonoras surgiram, no entanto, a mentalidade tem vindo a ser alterada com a também crescente utilização desta medida mitigadora e hoje será fundamental ter isso em conta no processo de escolha das barreiras sonoras. A barreira deverá estar bem contextualizada no ambiente em que se insere, sendo que se deve dar especial importância a zonas mais sensíveis a este aspecto, nomeadamente zonas residenciais importantes, zonas históricas e zonas de lazer como parques e zonas balneares. A utilização de soluções transparentes ou arquitectónicamente interessantes, ou até um simples tratamento exterior são procedimentos correctos na implementação das barreiras.

A viabilidade económica é sempre uma análise que terá de ser feita durante a realização de qualquer projecto de construção civil, e as barreiras sonoras não são excepção. Nem sempre é economicamente viável ter em consideração a totalidade dos correctos procedimentos no projecto das barreiras, sendo, por exemplo, muitas vezes, o impacto visual negativo resultante da implementação das barreiras é negligenciado com o objectivo de contenção de custos. Tudo se resumirá a uma análise custo benefício.

4.4. MODELO ESTRUTURAL

Existem tradicionalmente dois tipos básicos de modelos estruturais característicos das barreiras sonoras: as barreiras do tipo Poste-Painel, e as barreiras Auto-Sustentáveis.

4.4.1. BARREIRAS DO TIPO “PAINEL-POSTE”

Este é o tipo de sistema estrutural mais usado na construção de barreiras sonoras e, de uma forma muito geral, consiste na montagem de painéis absorventes ou reflectores entre postes assentes em fundações. Apesar de terem em comum este sistema estrutural, dentro deste grupo existe uma enorme variedade de soluções em termos de materiais e técnicas adoptadas.



Fig. 26 – Barreiras do tipo “Painel-Poste”

Este sistema estrutural é simples e fiável, pelo que se traduz em rapidez e economia na montagem das barreiras, sendo essa a principal vantagem que o torna o esquema mais utilizado neste tipo de projecto, em todo o mundo.

Como já foi dito, o esquema estrutural consiste num painel, que pode ser único ou dividido em subpainéis, que descarrega lateralmente os esforços em dois postes que os sustentam, e que se encontram encastrados nas devidas fundações.

A instalação das barreiras inicia-se então com a criação das fundações (Fig. 27). As soluções de fundação mais utilizadas são duas, a criação de blocos de betão armado onde se apoiarão directamente os postes, ou a utilização de sapatas contínuas.



Fig. 27 – a) Criação das Fundações. b) Sapata Contínua. c) Blocos de Betão Armado. (Fleming , G. et al, 2001)

A ligação do poste à fundação poderá também ser feita de diversas formas. As mais normais são aparafusando (Fig. 29) ou encastrando o poste à betonagem da fundação (Fig. 28). Os postes poderão ser de perfil metálico, nomeadamente de aço, ou de betão armado. A utilização de parafusos na ligação à fundação dos postes em betão torna-se mais complicada pela difícil integração dos sistemas de ligação por aparafusamento. Existem, no entanto soluções que tornam esta aplicação possível. Os perfis metálicos, por sua vez, poderão utilizar os dois sistemas de ligação sem grandes complicações.



Fig. 28 – Colocação do Poste no Cabouco (Durisol, 2009)



Fig. 29 – União do Poste por Parafusos à Fundação (Fleming , G. et al, 2001)

O tipo de ligação do pilar à fundação vai determinar o seu processo construtivo. Este inicia-se com a abertura dos caboucos, para se proceder à correcta betonagem. No caso das ligações em parafuso deve-se inserir correctamente os mecanismos de ligação na betonagem, de forma a fornecerem as características mecânicas necessárias à mesma. No caso da ligação de encastramento directo, deve-se inserir o pilar a determinada profundidade no cabouco, de forma a que a consequente betonagem se traduza no grau de encastramento pretendido. Dever-se-á ter o máximo cuidado na verificação das distâncias entre postes, e na sua correcta verticalidade, antes de se proceder à betonagem do cabouco, de forma a que a futura colocação do painel se dê sem problemas. Caso as sapatas sejam de configuração contínua, os processos atrás descritos deverão ser aplicados depois da cofragem das mesmas, no seu processo de betonagem.

A utilização de sapata contínua traduz-se num ganho de rigidez que poderá ser relevante no desempenho estrutural da barreira. No entanto, é possível obter este ganho de rigidez nas fundações em que se usam apenas blocos de betão, através da aplicação de um elemento em betão armado entre os postes (Fig. 30). Os postes ficam por sua vez embebidos no elemento, aumentando a sua rigidez de encastramento. Estes elementos permitem também dar apoio aos painéis que se irão sobrepor, e garantir um bom isolamento acústico da parte da base da barreira, que em algumas situações é incorrectamente negligenciado. Por fim, mas não menos importante, servirão ainda como protector da barreira, e de qualquer tipo de instalação sensível que esteja do lado de trás desta, contra o próprio tráfego, nomeadamente acidentes e despistes.



Fig. 30 – Utilização de elementos em betão entre postes (Durisol, 2009)

O uso de postes quer de aço, quer de betão, é compatível com o uso de vários tipos de painéis, sejam de betão, metal ou madeira. Existe ainda a possibilidade de utilização de postes em madeira, no entanto neste caso é aconselhável que a utilização de painéis seja condicionado aos de madeira. Em

muito poucos casos aplica-se a painéis metálicos, mas nunca a painéis de betão, sendo que pode traduzir-se em consequências estruturais graves (Fleming , G. et al, 2001).

Existe uma enorme variedade de painéis, mas de uma forma muito geral, pode-se dividi-los em dois grandes grupos (Fig. 31). O primeiro grupo será dos painéis a toda a altura, ou seja, contínuos de cima a baixo entre cada dois postes. O segundo, dos painéis empilhados, em que cada painel é constituído pelo empilhamento de subpainéis mais pequenos.



Fig. 31 – Painéis a toda a altura à esquerda e Painéis Empilhados à direita

Cada uma das soluções é caracterizada pela utilização de pré-fabricados, no entanto, nos painéis a toda a altura é maior o grau de pré-fabricação, o que trará vantagens em relação aos painéis empilhados a nível do tempo de instalação das barreiras. Porém, estes últimos permitem a execução de alturas variáveis, o que se torna vantajoso, permitindo a sua optimização, traduzindo-se em relevantes ganhos económicos. Poderá também ter vantagens em relação ao mais fácil transporte e manuseamento das suas partes.



Fig. 32 – Montagem dos painéis entre os postes (Durisol, 2009)

Em qualquer dos casos, os painéis serão pré-fabricados, devidamente transportados até ao local de implantação, e aí montados. Normalmente a sua montagem consiste na simples colocação dos painéis, ou do empilhamento dos subpainéis, entre os postes (Fig. 32). Os painéis normalmente apoiam-se num suporte colocado na base da barreira ligado de lado a lado aos postes ou então directamente nos blocos de fundação, pelo que, em qualquer dos casos a transferência do peso próprio dos painéis ocorre em esquema de cargas pontuais, na base do poste no primeiro caso, ou no topo da fundação no segundo caso. No caso de sapatas contínuas, este tipo de esforço será transmitido uniformemente ao longo da mesma.

A largura, altura e espessura dos painéis são variáveis dependendo da solução adoptada. No entanto, em geral a largura varia entre os 3 e os 6 metros e a espessura entre os 8 e os 20 centímetros. A utilização de maior espaçamento entre postes poderá ser economicamente vantajoso, mas pode restringir apenas o uso da solução de painéis empilhados, devido às possíveis incompatibilidades de transporte de painéis a toda a altura com larguras elevadas. Por outro lado, painéis mais longos estarão sujeitos a momentos maiores, pelo que maiores custos poderão estar associados à aquisição das resistências necessárias.

4.4.2. BARREIRAS AUTO-SUSTENTÁVEIS

Este tipo de solução não depende de postes ou pilaretes para assegurar a sua estabilidade estrutural. Esta é feita pela própria configuração da barreira, ou dos painéis no caso de serem pré-fabricados.

Neste caso, o peso é preponderante, visto ser esta a acção estabilizadora da barreira, pelo que o seu dimensionamento deverá ter especial atenção a este ponto.

O muro deverá ser assente em fundações de betão armado e usualmente ligado a este por meio de armação específica. A fundação neste caso deverá ser de configuração contínua, visto a descarga ser feita de forma distribuída ao longo do comprimento do muro, e não de forma pontual como aconteceria no caso de existência de postes.

Este tipo de barreiras poderá representar vantagens e desvantagens em relação às do grupo apresentado no subcapítulo anterior. Em termos mecânicos, de um modo geral este esquema representa maiores capacidades resistentes, que tem a ver com a sua maior robustez. Pode também representar maior rapidez de execução, no caso de barreiras constituídas por painéis pré-fabricados. No entanto, este tipo de solução costuma representar também custos mais elevados, resultantes de igual forma da necessidade de maior robustez deste tipo de painel. Por outro lado, são também bem menos flexíveis, em termos de se adaptarem à topografia do terreno, problema que poderá nalguns casos ser preponderante.

4.5. TIPOS DE BARREIRAS SONORAS

4.5.1. BERMAS SONORAS

Este tipo de solução consiste na aplicação de uma sobrelevação do terreno na berma da via de forma a que o obstáculo à propagação do ruído seja criado (Fig. 33). Como a barreira é criada por um aterro, não se poderá inserir em nenhum dos esquemas estruturais enunciados anteriormente, porque na verdade não possui verdadeiramente um.

A dita sobrelevação é construída através do depósito e conveniente compactação e contenção, de materiais terrosos, tal como solo arenoso, argiloso, rocha e escombros. Os materiais usados são, sempre que possível, fornecidos por excessos resultantes das escavações da execução do próprio projecto da via. Em certas condições, o próprio talude resultante da escavação necessária à via, poderá

servir por si só de uma barreira de protecção ao ruído, sem mais custos adicionais, o que o torna numa interessante solução.

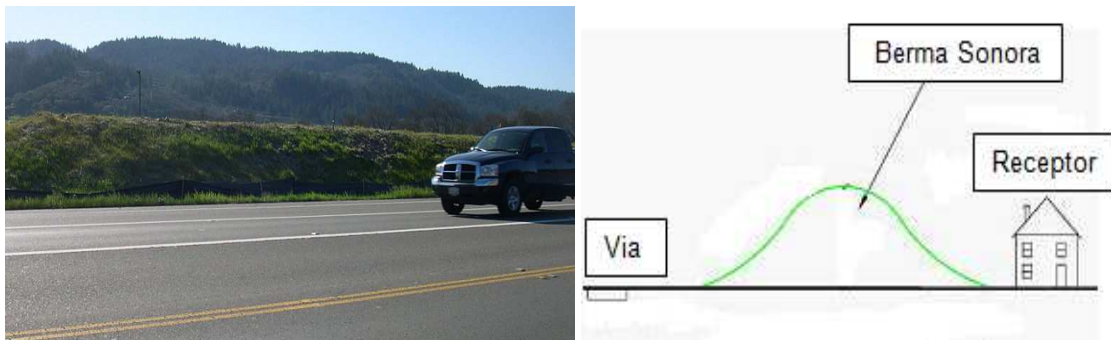


Fig. 33 - Bermas Sonoras (Fleming, G. et al, 2001)

As medidas geométricas das bermas sonoras têm a ver com as cotas do receptor a ser protegido, mas aconselha-se que a inclinação dos seus taludes sejam cerca de 30° (2:1), sendo que em certos casos inclinações até cerca de 45° (1:1) serão também aceitáveis. No caso das bermas que utilizem aterros derivados de rocha as inclinações dos taludes poderão subir ainda mais, tendo sempre em consideração os factores da sua estabilidade, nomeadamente os ângulos de atrito. O topo das bermas poderão ser nivelado a uma certa largura, fornecendo uma área que permite alguns ganhos funcionais, como será exemplo a melhor manutenção e a mais fácil implementação de vegetação, vedações, ou até mesmo uma possível barreira sonora aumentando o seu desempenho acústico. A implementação de ciclovias nestes nivelamentos tornam-se também uma ideia interessante, desde que sejam instaladas os devidos equipamentos de segurança.

Este tipo de solução, apesar de ainda não muito utilizada, apresenta diversas vantagens. Por um lado, é caracterizada por uma boa capacidade de absorção sonora. Apesar do seu desempenho acústico não ter sido ainda suficientemente estudado e variar muito conforme os diferentes materiais de aterro, geometrias e graus de compactação, é em regra geral melhor que as barreiras sonoras mais ortodoxas. Por outro lado, a utilização do próprio terreno para o amortecimento do ruído, traduz-se em vantagens estéticas, sendo que não só se supera o impacto visual das barreiras propriamente ditas, como também se permite um bom enquadramento estético da própria via. As bermas sonoras permitem ainda a plantação de vegetação, o que poderá tornar ainda melhor esse mesmo enquadramento estético. O custo da sua instalação poderá também representar uma boa vantagem, mas apenas no caso de o material ser fornecido pelas escavações do próprio projecto de execução da via, sendo que a compra por fora traduzir-se-á num grande aumento do preço.

No entanto, a utilização das bermas sonoras implica também algumas desvantagens. A mais evidente é a necessidade de uma largura extra significativa de via e, tendo em consideração que geralmente esta se caracteriza por grandes extensões longitudinais, tal necessidade traduz-se num aumento elevado dos custos de expropriação. Outra poderá ser a já falada falta de conhecimentos e rigor acerca do seu desempenho acústico.

Em termos de manutenção e durabilidade, sendo sido construídas correctamente, não se deverão levantar grandes problemas, tendo especial atenção, no entanto, ao tratamento da vegetação que se plantou, ou que se venha a estabelecer ao longo da sua vida útil, assim como a acção da água que poderá ter impactos preocupantes ao nível da estabilidade do talude, pelo que torna-se essencial a correcta instalação dos respectivos mecanismos de impermeabilização e escoamento de águas ao longo das bermas.

4.5.2. BARREIRAS FLORESTAIS

Uma outra arrojada solução de amortecimento do ruído rodo e ferroviário, é a utilização de vegetação densa que crie de certa forma uma barreira à propagação do som (Fig. 34). Este é igualmente um sistema natural de isolamento sonoro, pelo que obviamente não se poderá falar de qualquer esquema estrutural.

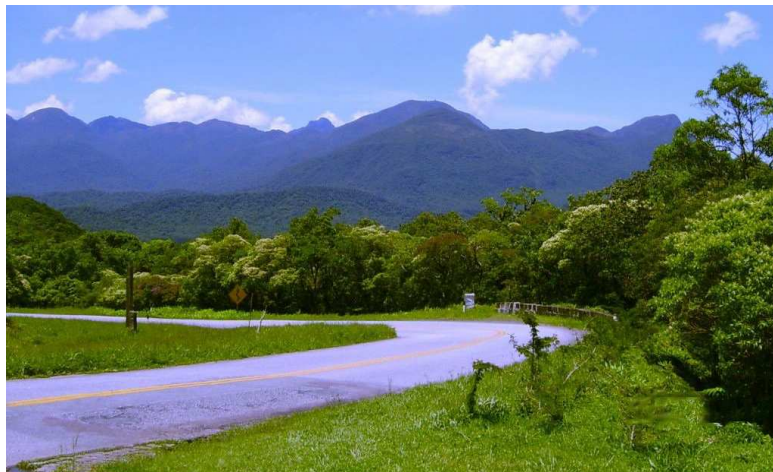


Fig. 34 – Barreiras Florestais

De um modo geral, folhas, pequenos ramos e arbustos têm a propriedade de absorver, ainda que parcialmente, a energia acústica. Por outro lado, troncos, ramos pesados e folhagem densa difundem e espalham o som. Estas serão, então, as características que permitem a aplicação da vegetação como isolador sonoro. No entanto, verifica-se que o processo de difusão do som, neste caso, assume bem maior importância que a de absorção, sendo que este último só se verifica positivo em frequências muito altas.

Para frequências elevadas de som, as barreiras constituídas de folhagem são mais eficientes, sendo que esta eficiência aumenta com a densidade da folhagem, a largura e a espessura das folhas. Por exemplo, um ruído com 4.000 Hz de frequência sofrerá uma atenuação de 5 dB em uma cortina de vegetação de 30 metros de largura com folhagem densa, enquanto que para um ruído com frequência de 1000 Hz, a atenuação conseguida nas mesmas condições é de aproximadamente 3 dB. (Rodrigues, V., 1984)

Existem portanto 3 factores preponderantes na determinação da eficácia da utilização deste tipo de solução: localização, largura e tipo de vegetação do cinturão.

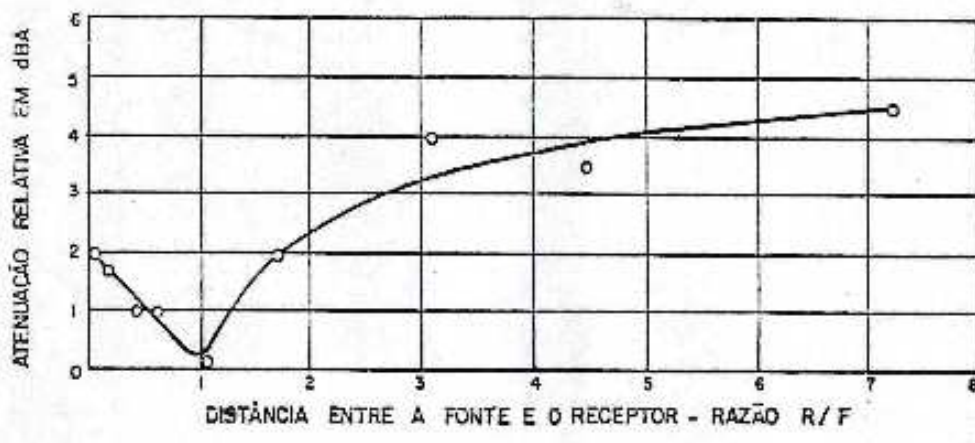


Fig. 35 – Atenuação Sonora pelo efeito da Localização do Cinturão (Rodrigues, V., 1984)

A posição do cinturão assume de facto um papel preponderante no abatimento do ruído, sendo que quanto mais próximo da fonte ou do receptor estiver maior a eficácia, pelo que o isolamento será mínimo exactamente no meio da distância entre eles, como se verifica na Fig. 35.

Por sua vez, a largura da floresta de isolamento acústico não deve ser nunca inferior a 15 metros de forma a se obter uma difusão do som aceitável (Fig. 36)

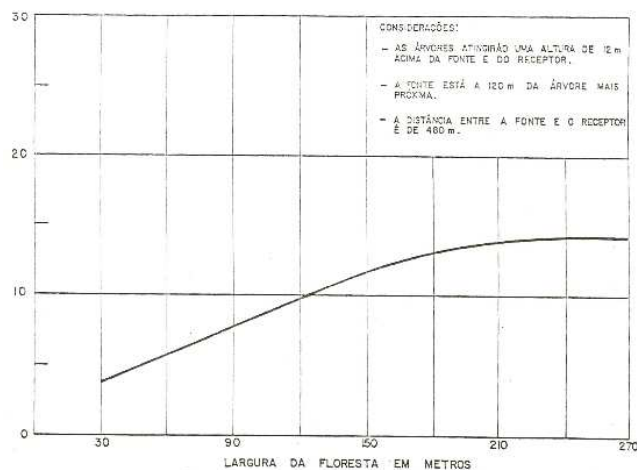


Fig. 36 – Atenuação Sonora pelo efeito da Largura do Cinturão (Rodrigues, V., 1984)

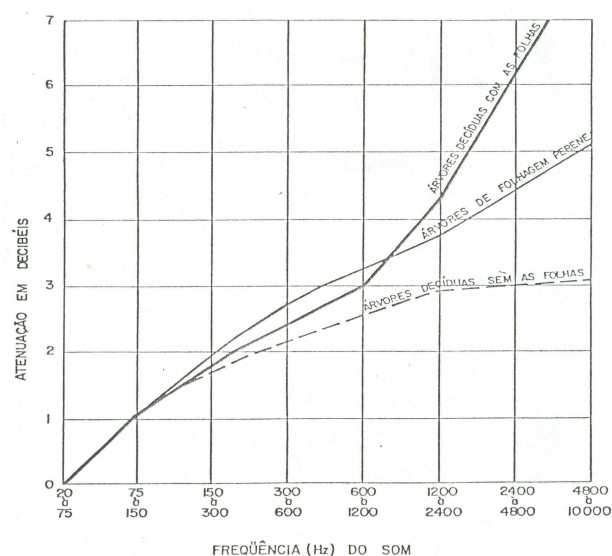


Fig. 37 – Atenuação Sonora considerando vários Tipos de Vegetação (Rodrigues, V., 1984)

Finalmente, será óbvia a importância do tipo de vegetação utilizada no cinturão (Fig. 37). Esta deverá ter em conta os seguintes factores:

- A vegetação deve ser densa o suficiente para impedir a propagação do som através dos espaços entre as árvores, independente da largura do cinturão verde;
- Deve haver um sub-bosque denso, para que o ruído não se propague por baixo das copas do primeiro estrato;
- No lado do cinturão verde voltado para a fonte sonora, deve ser plantada uma vegetação com altura decrescente na direção da fonte de forma a direccionar parte do ruído para cima, preservando ainda mais o receptor;

- Com o objectivo de tornar o efeito constante, é melhor que a vegetação seja perenifólia (não apresente desfolhamento durante o ano), sendo que quanto mais frio for o clima ou mais estreito o cinturão, maior será a necessidade de árvores que não desfolhem.

A utilização de florestas como barreira sonora apresenta vantagens e desvantagens evidentes. Por um lado a utilização de vegetação é sinónimo de um óptimo enquadramento estético, sendo que o impacto visual, ao contrário de qualquer outra solução, será mais positivo que negativo, trazendo ainda outras vantagens ambientais. No entanto, por outro lado, as desvantagens são preponderantes. A utilização desta solução implica uma enorme distância entre fonte e receptor, ultrapassando os 400 metros, sendo que será também necessária a plantação de cinturões de dezenas de metros de largura para se obter reduções sonoras significativas, pelo que a sua aplicação em vias de comunicação não será de todo prática. Será mais apropriada à mitigação de outros tipos de fontes de ruído tal como aeroportos.

4.5.3. PAINÉIS DE BETÃO ARMADO REVESTIDOS A BETÃO MADEIRA

Uma das soluções mais adoptadas na implementação de barreiras acústicas é a instalação de painéis de betão armado que são sujeitos à aplicação de um revestimento rugoso com boas capacidades de absorção acústica. Um desses possíveis revestimentos, vulgarmente usado, é o betão madeira (Fig. 38), que deve o nome à mistura entre cimento e farripas de madeira devidamente tratadas, mistura essa que garante uma boa capacidade de absorção sonora. (SonoFábril, 2009)



Fig. 38 – Barreiras Sonoras revestida a blocos de Betão Madeira

A instalação consiste, normalmente, na aplicação do revestimento directamente sobre o painel de betão, no entanto é também possível em certos casos, que o revestimento seja desde logo montado em fábrica no painel pré-fabricado (Fig. 39).



Fig. 39 – Colocação do revestimento de Betão Madeira, e de Painéis já Revestidos (Fleming , G. et al, 2001)

As medidas standard das placas de betão madeira geralmente são $0.50 \times 0.50 \text{ m}^2$, $0.50 \times 0.936 \text{ m}^2$ ou $0.936 \times 0.936 \text{ m}^2$. As espessuras e peso relativos dos painéis poderão variar, sendo que as mais normais são 130 mm e 80 kg/m², ou 180 mm e 120 kg/m². Diferenças de espessura traduzem-se obviamente em variações do desempenho acústico. (SonoFabril, 2009)

A este tipo de solução estão inerentes várias vantagens, nomeadamente a sua resistência a vários níveis. A utilização de painéis de betão armado, revestidos com betão madeira, garante elevada resistência ao fogo (M1), a gradientes térmicos, grandes diferenças de potencial eléctrico, agressões biológicas e actos de vandalismo. Isto implica que a manutenção ao longo da vida de exploração da obra seja quase nula. (SonoFabril, 2009)

Outra vantagem está na sua boa capacidade de absorção acústica (> 6 dB) para comprimentos de onda que vão desde os 250 até os 4000 hertz. Os coeficientes de absorção sonora para diferentes espessuras, encontram-se nas Fig. 40 e 41.

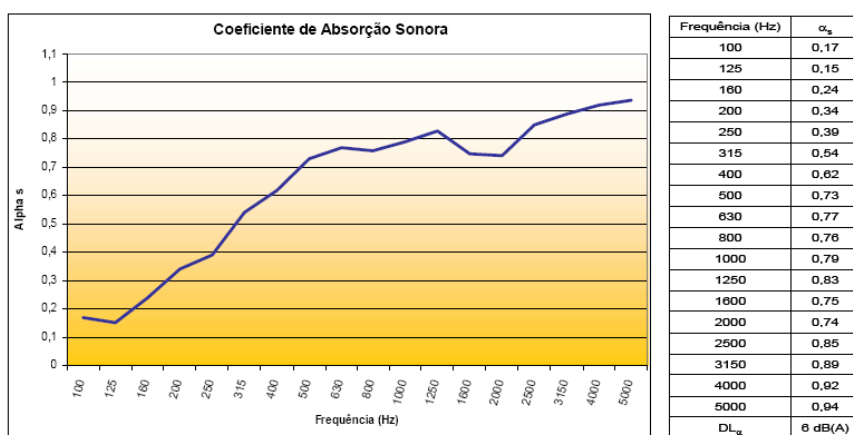


Fig.40 – Absorção sonora dos painéis revestidos a betão madeira para espessuras de 130 mm (SonoFabril, 2009)

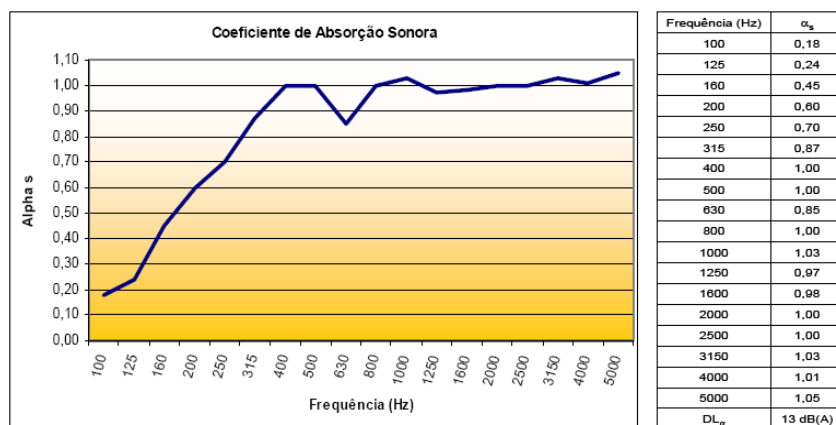


Fig.41 – Absorção sonora dos painéis revestidos a betão madeira para espessuras de 180 mm (SonoFabril, 2009)

O tratamento estético, neste caso, poderá ser feito através da pigmentação do betão madeira, e, se necessário, do painel de betão armado do lado de trás da barreira. As rugosidades características das placas de betão madeira poderão também ser utilizadas de forma a obterem-se formas e texturas que se tornem visualmente agradáveis (Fig. 42).



Fig. 42 - Tratamento estético do Betão Madeira (SonoFabril, 2009)

A aplicação do betão madeira traduz-se ainda noutro tipo de vantagem. A sua aplicação não é limitada a barreiras do tipo “poste-painel”, pois é de todo possível utilizá-lo para revestir de forma simples qualquer tipo de muro de betão que assegure as exigências de resistência. Isto poderá traduzir-se em ganhos económicos quando, por exemplo, se procede à reutilização de muros existentes no local, transfor-mando-os em boas barreiras sonoras.

A desvantagem desta solução poderá estar na morosa instalação do revestimento, que se poderá traduzir num aumento significativo do tempo da construção da barreira e na necessidade de mão de obra extra.

4.5.4. PAINÉIS DE BETÃO REVESTIDOS A BETÃO POROSO

Este tipo de solução assemelha-se em muito ao apresentado na secção anterior. Consiste num painel em betão armado com uma camada com capacidade de absorção sonora (Fig. 43), constituída por betão poroso. Neste caso, a camada de betão poroso não é aplicada no painel durante a instalação da barreira, mas sim pré-fabricado com o próprio painel.



Fig. 43 – Barreira Sonora revestida a Betão Poroso (SonoFabril, 2009)

Um exemplo deste tipo de painéis é o “Alpos 02” (Fig. 44). Estes painéis são constituídos por um lado de uma estrutura de 9 cm de betão armado, que garante a sua resistência mecânica, e pelo outro lado, a sua superfície é coberta com uma capa de 7 cm de espessura máxima de betão poroso, canelada, que

tem a função de absorção sonora. Entre estas duas camadas existe uma malha 150x150x6 mm, que tem uma função isolante e resistente. (SonoFábril, 2009)

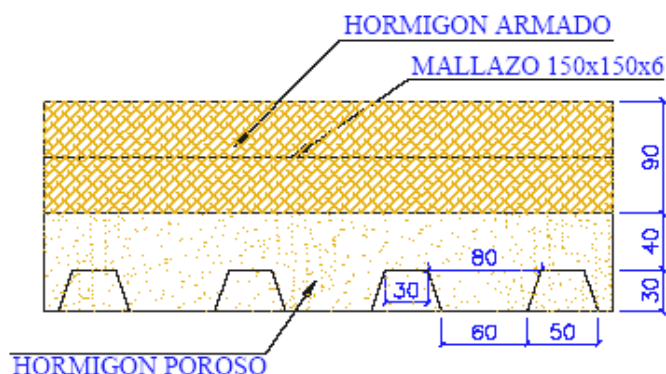


Fig. 44 – Esquema das camadas de painéis revestidos a Betão Poroso (SonoFábril, 2009)

Em relação ao desempenho acústico, estes tipos de painéis têm um índice de absorção DL de 3,00 dB, cujo coeficiente α_s é analisado na Fig. 45, correspondendo à classificação de A1 de acordo com a EN 1793-1. Por sua vez o índice de isolamento DLR é de 46 dB, B3 segundo a EN 1793-2. (SonoFábril, 2009)

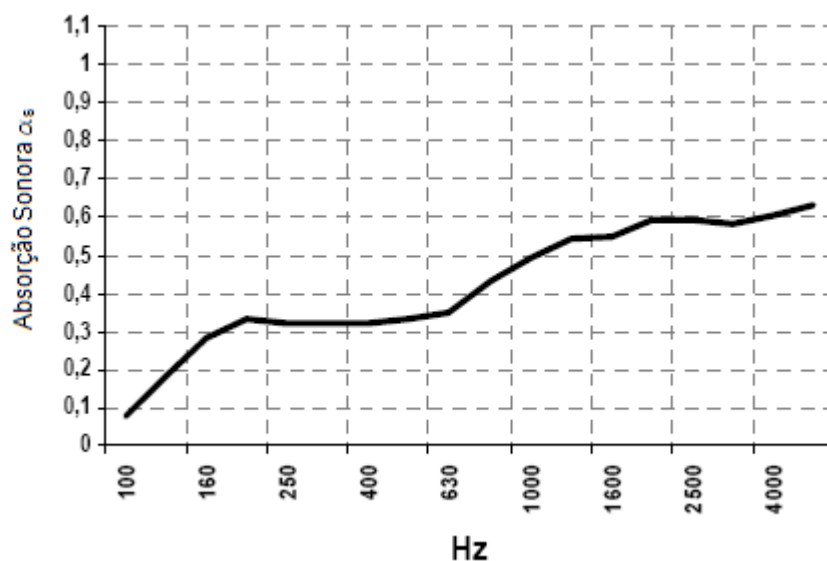


Fig. 45 – Absorção Sonora a diferentes frequências de painéis revestido a Betão Poroso (SonoFábril, 2009)

Esta solução possui um nível de pré-fabricação maior que a da secção anterior, o que poderá trazer vantagens ao nível da instalação. No entanto, são mais complexas, pelo que serão também mais caras, devido à sua mais exigente fabricação. Como se trata de painéis inteiros possui todas as desvantagens desse tipo de solução. O transporte é uma delas, devido às medidas geométricas mas principalmente ao peso, que neste tipo de solução torna-se significativamente elevado.

O “Alpos 02” é, no entanto, um produto específico. Existem outros dentro deste grupo que mantendo o princípio de absorção, variam em termos de instalação. Alguns baseiam-se na utilização de subpainéis pré-fabricados empilhados (Fig. 46), com o devido revestimento de betão poroso, o que se traduz em vantagem de ligeireza, que poderá ser importante tendo em consideração o grande peso específico deste tipo de painel.



Fig. 46 – Painéis Empilhados revestidos de Betão Poroso

Também este tipo de painel poderá sofrer vários tipos de tratamento estético, sendo que a sua pigmentação é o método mais usado para tal. O betão poroso poderá ser obtido desde logo num váriado leque de cores (Fig. 46), que em conjunto com as formas da textura escolhidas pelo designer deverá resultar numa boa solução estética, tendo em consideração o contexto em que se irá inserir.



Fig. 47 – Vários tipos de pigmentação a aplicar ao Betão Poroso

Com a utilização de diversos designs da sua superfície canelada, em conjunto com uma correcta pigmentação, podem-se obter resultados satisfatórios no enquadramento estético necessário ao contexto em que as barreiras se inserem.

4.5.5 PAINÉIS EM BETÃO SEM REVESTIMENTO ACÚSTICO

Existe também a possibilidade de usar painéis de betão armado, sem qualquer tipo de revestimento (Fig. 48). Desta forma a barreira funcionará como superfície reflectora.



Fig. 48 – Painéis em Betão sem revestimento acústico

Aliada à elevada resistência mecânica e a todos os outros agentes ambientais e sociais, já discutida nos outros tipo de soluções em betão, a principal vantagem da utilização deste tipo de painel é a sua consideravelmente maior simplicidade de instalação, traduzindo-se em ganhos económicos e de tempo de execução.

As desvantagens da utilização de painéis simples em betão armado prendem-se com o facto de os mesmos serem reflectores, que, como já foi visto, se poderá traduzir em fenómenos não desejados, e num mais difícil controlo da propagação do ruído.

É necessário ainda ter-se especial cuidado, nestes casos, na análise da densidade do betão dos painéis que deve ser suficientemente elevada para que a barreira funcione como reflectora das ondas sonoras de forma satisfatória.

A superfície deverá ser tratada caso a caso de forma a se obter um melhor enquadramento no contexto que se insere. Esse tratamento poderá ser feito através da aplicação de variadas formas e texturas á superfície e em certos casos através da utilização de cor obtida da aplicação de tintas ou da pigmentação do betão (Fig. 49). Pode-se ainda recorrer a revestimentos, sem capacidade de absorção acústica, mas que permitam apenas obter resultados estéticos mais agradáveis.

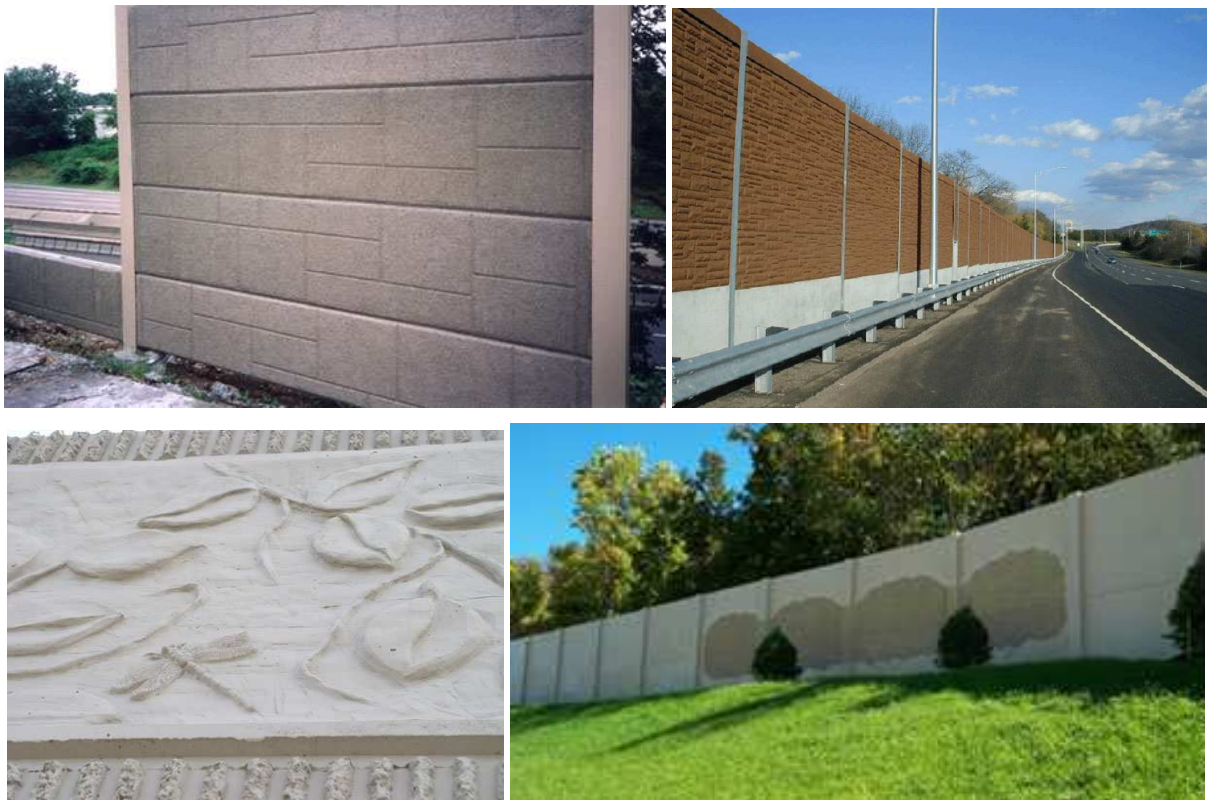


Fig. 49 – Vários tipos de tratamento estético da superfície dos painéis de betão

A utilização de determinadas texturas de superfície poderá traduzir-se em ganhos acústicos. Apesar de a absorção sonora não se tornar possível, pode-se criar fenómenos de difusão do campo acústico, que melhoraram o seu isolamento. Assim, a utilização de texturas rugosas ou a criação de cavidades na superfície dos painéis de betão armado (Fig. 50) será vantajosa do aspecto acústico.

A obtenção de diferentes texturas é facilmente conseguida através da intervenção artística ao nível dos moldes de cofragem onde se processará a betonagem dos painéis durante a préfabricação dos mesmos.



Fig. 50 – Utilização de superfícies rugosas nos Painéis de Betão

A necessidade de manutenção deste tipo de barreira é geralmente ainda menor que as outras de betão armado, devido à inexistência de revestimentos. Em certos casos, a manutenção reduz-se à nulidade, traduzindo-se em custos quase inexistentes ao longo da exploração da obra. Isto, aliado à sua simplicidade, faz com que as barreiras de betão sem revestimento, sejam umas das mais utilizadas soluções de protecção contra o ruído em vias de comunicação.

4.5.6. PAINÉIS DE BETÃO LEVE

Uma boa solução para se obter bons desempenhos acústicos, apesar de não muito utilizada, é a utilização de painéis de betão leve (Fig. 51) que, devido às suas características de baixa densidade, é caracterizada por uma boa capacidade de absorção sonora.

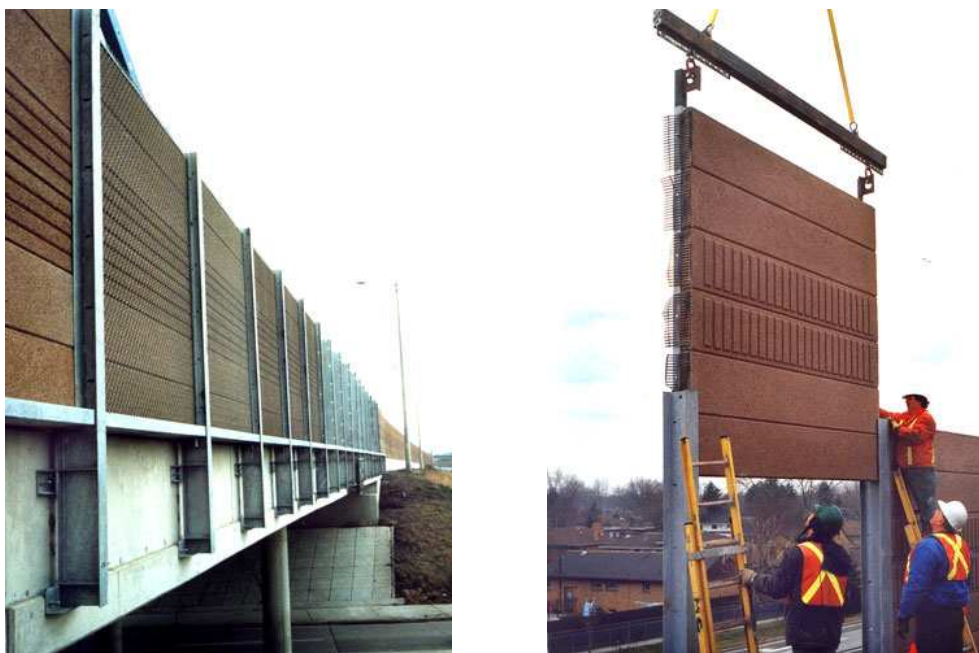


Fig. 51 - Painéis de Betão Leve e sua Instalação (Durisol, 2009)

O segredo para se obter betões leves, está nos seus agregados, sendo que, por exemplo, a utilização de cinzas voláteis ou fibra de vidro na composição do betão são soluções para a diminuição da densidade, sem em muito comprometer o seu desempenho mecânico.

Uma interessante solução que tem vindo a ser estudada, é a aplicação de betão reciclado como agregado para obter betões com menores densidades e bons desempenhos mecânicos. Os agregados deverão, no entanto, ser cuidadosamente analisados e escolhidos com base em rigorosos requisitos de qualidade. (Jamgocian, A., 1997)

A utilização deste tipo de material resulta numa dupla vertente ecológica, resultando na utilização de material de construção reciclado em infra-estruturas de mitigação de impactos ambientais. Poderá traduzir-se, por um lado, em ganhos de imagem para a empresa e, por outro, em ganhos económicos, inerentes ao reaproveitamento de material que em princípio não teria qualquer uso e que só seria sinónimo de gastos para a sua remoção e destruição.

O facto de se caracterizarem pelo baixo peso torna as barreiras com painéis em betão leve, numa boa opção para serem aplicadas sobre estruturas, como, é exemplo, as pontes. Desta forma, a sua instalação não se traduz em incrementos demasiadamente significativos de esforços verticais, não comprometendo assim de uma forma geral a estabilidade mecânica dessa mesma estrutura. O baixo peso poderá ainda ser sinónimo de vantagens de transporte e instalação, não sendo necessários equipamentos de tão elevada capacidade.

As desvantagens dos painéis de betão leve consistem na sua mais fraca resistência mecânica em relação ao betão normal e aos maiores custos de produção. É, no entanto, possível utilizando os correctos agregados, obter-se boas capacidade mecânicas ao mesmo tempo que a densidade seja a necessária para não comprometer o desempenho acústico.

4.5.7. PAINÉIS METÁLICOS

Os painéis metálicos (Fig. 52) têm vindo a ser talvez o tipo de painel mais utilizado em barreiras sonoras em Portugal, não só em vias de comunicação, mas também como medida de mitigação a vários tipos de fontes de ruído que se verifica nos meios urbanos.



Fig. 52 – Barreiras de painéis metálicos

Existem dois tipos de painéis metálicos, os reflectores e os de absorção. Os reflectores consistem apenas na utilização de uma superfície de aço galvanizado apoiado entre dois postes. Esta solução apesar de ser uma das mais simples e baratas, deve ser utilizada apenas em casos muito especiais, pois a resistência dos painéis é muito baixa a vários níveis. Em termos estruturais, apesar do seu baixo peso implicar baixas cargas verticais, as cargas impostas pelo vento ou por pressões aerodinâmicas poderão ser críticas á sua segurança. A resistência ao vandalismo, a despistes e aos agentes climáticos são também algumas das desvantagens á sua utilização. Em termos acústicos, o seu desempenho também não será o mais satisfatório.

Devido à sua simplicidade e baixos custos, a utilização de painéis metálicos reflectores (Fig. 53) é

então mais apropriada para o isolamento de fontes de ruído temporárias, resultantes, por exemplo, de obras de construção civil, ou então de equipamentos mecânicos.

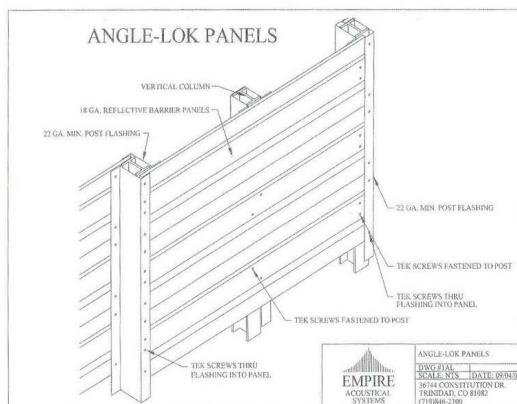


Fig. 53 – Paineis Metálicos Reflectores (EMPIRE, 2009)

Os painéis metálicos de absorção sonora são, no entanto, uma inteligente solução a ser aplicada nas vias de comunicação, aliando a simplicidade de instalação a muito bons desempenhos acústicos. Este tipo de painel consiste, geralmente, num caixão de chapa de aço galvanizado, o qual é preenchido por dois painéis semi-rígidos de lã mineral, separados entre si por uma folha metálica (Fig.54).

O caixão de chapa de aço galvanizado serve de suporte estrutural ao elemento isolante e é perfurada a uma taxa de cerca de 34 % para que não funcione como reflector. A espessura do aço é geralmente entre os 1 e os 1,2 mm e a galvanização poderá ser aferida conforme o ambiente de exposição, mas em geral é entre 275 a 600 gr/m² tendo uma espessura mínima de 18 microns. (SonoFabril, 2009)

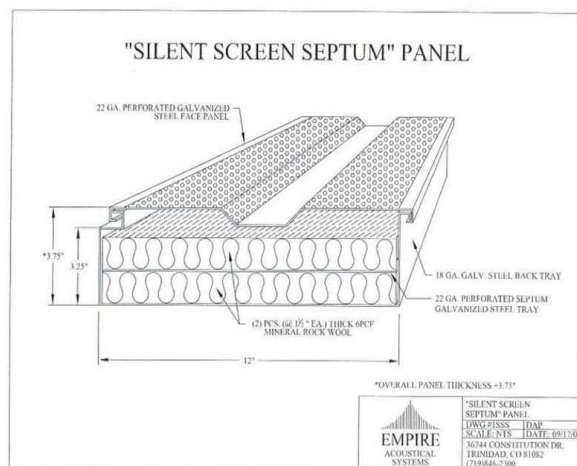


Fig. 54 – Corte e esquema de um Paineis Metálicos de Absorção (EMPIRE, 2009)

A absorção sonora é garantida pelos elementos de lã de rocha, com espessura de cerca de 40 mm cada, e densidade de 100 kg/m³. Este material é incombustível e não hidrófilo. Nas faces à vista, o painel de lã de rocha tem colado uma membrana de lã de vidro têxtil que o protege da erosão, da humidade e evita o desfibrilhamento.

Os painéis são constituídos pelo empilhamento destes caixões, sendo que as juntas horizontais serão do tipo compribanda, colocadas no momento da montagem.

Em termos de desempenho acústico, estes painéis metálicos têm um índice de absorção $DL\alpha$ de 12 dB (A4 de acordo com a EN 1793-1) e um índice de isolamento de DLR de 27 dB (B3 de acordo com a EN 1793-2). Estes valores catalogam este produto nas categorias máximas de ambas as normas de isolamento e absorção. Os coeficientes de absorção sonoras para diferentes frequências podem ser analisados na Fig. 55. (SonoFabril, 2009)

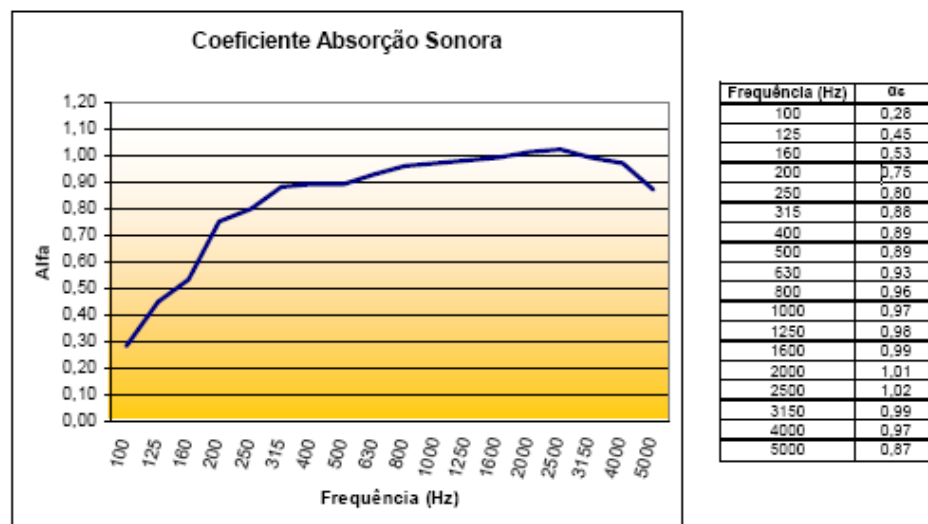


Fig. 55 – Coeficientes de Absorção Sonora para Painéis Metálicos de Absorção

A sua simplicidade de instalação e os seus muito bons desempenhos acústicos, serão as principais vantagens da utilização deste tipo de painel em barreiras sonoras. Por outro lado, os tipos de materiais utilizados na sua produção não apresentam custos elevados, pelo que é em geral um tipo de solução interessante do ponto de vista económico.

As desvantagens terão a ver com a não tão boa capacidade de resistência quando comparado com o betão, nomeadamente em termos de cargas horizontais, como são exemplos a força do vento, as pressões aerodinâmicas e a resistência ao choque resultante de vandalismo e despistes.

Em relação ao seu tratamento estético, os painéis metálicos, de uma forma geral, não permitem que a sua textura varie muito, pelo que se deverá recorrer à cor de forma a garantir o melhor enquadramento possível. A cor é aplicada através duma pintura a quente segundo a cor solicitada, com espessura de recobrimento total sobre o metal de 80 microns (SonoFabril, 2009). Costuma-se empilhar painéis com diferentes cores, de forma a obter-se um jogo de cores agradável, que permita um enquadramento visual mais correcto possível, de forma a suavizar o impacto estético causado pela implementação da barreira.

4.5.8. PAINÉIS DE MADEIRA

É também possível proceder-se à utilização de painéis de madeira para construção de barreiras acústicas. Esta solução é, no entanto, muito pouco usada, como resultado das desvantagens da sua utilização serem preponderantes em relação às vantagens.

Este tipo de barreiras são normalmente constituídas todas em madeira, nomeadamente a própria estrutura, sendo que a utilização de postes de aço ou betão é também possível. O material utilizado é em regra geral o contraplacado, madeira laminada colada, ou madeira com tratamento sobre pressão (Boothby, T. et al, 1997). Seja qual for o tipo de madeira deve ser sujeita aos devidos tratamentos para obter a necessária resistência aos agentes climáticos e biológicos. Os painéis não deveram ter grande largura entre postes, de forma a prevenir a criação de fendas.

A principal vantagem na utilização de madeira em painéis de barreiras sonoras será o aspecto natural que os caracteriza, que permite em geral um bom enquadramento estético, o que resultará num impacto visual menos negativo. Outras vantagens poderão lhe estar associadas, nomeadamente o seu fácil transporte, e a sua boa resistência mecânica. A madeira é também caracterizada pela fácil montagem, sendo que as ligações entre elementos poderão facilmente serem feitas pela rápida aplicação de pregos.

As desvantagens por sua vez são, no entanto, muitas. Uma delas será a difícil capacidade de prever o comportamento da madeira, quer a nível mecânico, quer a nível acústico, devido à sua anisotropia, o que poderá ser crítico ao seu correcto funcionamento. Por outro lado a sua susceptibilidade ao fogo caso a sua superfície não seja devidamente tratada, poderá levantar problemas de segurança à sua utilização. Fenómenos de dilatação são também difíceis de controlar nas madeiras, sendo que a abertura de fendas resultante da mesma poderá comprometer a acústica da barreira. Por fim, e talvez a mais preponderante, apresenta desvantagens a nível económico, sendo que para barreiras demasiadamente longas torna-se inviável, devido ao custo dos materiais, dos tratamentos químicos, e da mão de obra necessária para a montagem dos painéis.



Fig. 56 – Exemplos de utilização de Barreiras Sonoras de Madeira (Fleming , G. et al, 2001)

Todas estas desvantagens tornam a utilização de madeira em barreiras sonoras uma solução muito pouco usada em Portugal e, em geral, na Europa. Pode-se, no entanto, encontrar algumas aplicações deste tipo, principalmente nos Estados Unidos, em geral em zonas florestais com bons fornecimentos de madeira, que se traduz em menores custos de aquisição do material.

4.5.9. PAINÉIS TRANSPARENTES

A solução mais aceite entre a comunidade, para a redução do impacto visual causado pela instalação de barreiras acústicas, é a utilização de painéis transparentes (Fig.57). Esse é de facto o único grupo de

painéis que permitem o bloqueio da propagação das ondas sonoras sem bloquear, de igual forma, o campo de visão.



Fig. 57 – Vários Tipos de Painéis Transparentes

O material utilizado na produção dos painéis transparentes poderá ser o vidro ou algum tipo de plástico transparente (Fleming , G. et al, 2001). A utilização de vidro não é muito usual, já que para obter boas resistências, nomeadamente através do temperamento do vidro, os custos de produção seriam demasiadamente elevados. Assim sendo, costuma-se recorrer ao plástico transparente para a produção destes painéis, em especial, ao acrílico.

O acrílico poderá ser produzido de duas formas: o acrílico fundido e o acrílico extruído. Ambos terão características semelhantes, sendo que o custo de produção do primeiro é maior que o do segundo. O acrílico fundido permite, no entanto, maiores resistências aos raios UV, o que lhes garante a conservação ao longo do tempo das suas propriedades mecânicas e de transparência. Caracterizam-se ainda por uma resistência térmica mais elevada. O extruído é, no entanto, mais utilizado em exteriores, devido ao seu mais baixo custo de produção. (SonoFábril, 2009)

Os painéis de acrílico possuem uma densidade de $1,19 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^2$, estando disponíveis em espessuras de 15, 20 e 25 mm. Os painéis são fabricados com a largura standard de 2000 mm, e o comprimento poderá ir até aos 5000 mm em painéis de acrílico fundido, e 6000 mm em painéis de acrílico extruído. (SonoFábril, 2009)

Os painéis em acrílico, quer seja extrudido quer seja fundido, apresentam idênticos valores de isolamento ao ruído, variando o valor apenas com a espessura da chapa pretendida.

Os valores obtidos para o índice de isolamento DLR são de aproximadamente 30 dB para espessuras de 15 mm, 32 dB para espessuras de 20 mm e 33 dB para espessuras de chapa de 25 mm, o que colocam este material na categoria máxima, B3, de acordo com a norma EN 1793-2. (SonoFabril, 2009)

Sendo este tipo de painel do tipo reflector, é usual utilizar-se barreiras inclinadas ou então de superfícies curvas que permitem a mais fácil dissipação das ondas sonoras reflectidas, o que pode ser essencial para a protecção de receptores do lado contrário da via, ou mesmos dos próprios utilizadores da mesma.

Apesar da transparência característica deste tipo de painéis ser uma vantagem óbvia na diminuição do impacto visual geralmente inerente à construção de barreiras sonoras, existem alguns cuidados a ter derivados da mesma. Tem-se verificado que a transparência poderá induzir em erro os animais, em especial as aves, que, confundidos, pensam que poderão atravessar a barreira na zona dos painéis transparentes, o que provoca que muitas vezes entram em choque com esta. Assim, em especial em zonas naturais de fauna rica, é aconselhável recorrer-se a algum tipo de método para identificar a presença das barreiras. Isto pode ser feito pela coloração dos painéis ou, então, pela colocação de autocolantes nos mesmos (Fig. 58). A forma dos autocolantes poderá ser variada, sendo, no entanto, muito usual a colocação de autocolantes em forma de ave de rapina, que servirá de forma mais eficaz para afastar possíveis aves de tentarem atravessar aquele trecho da barreira, evitando, portanto, que entrem em choque com ela.

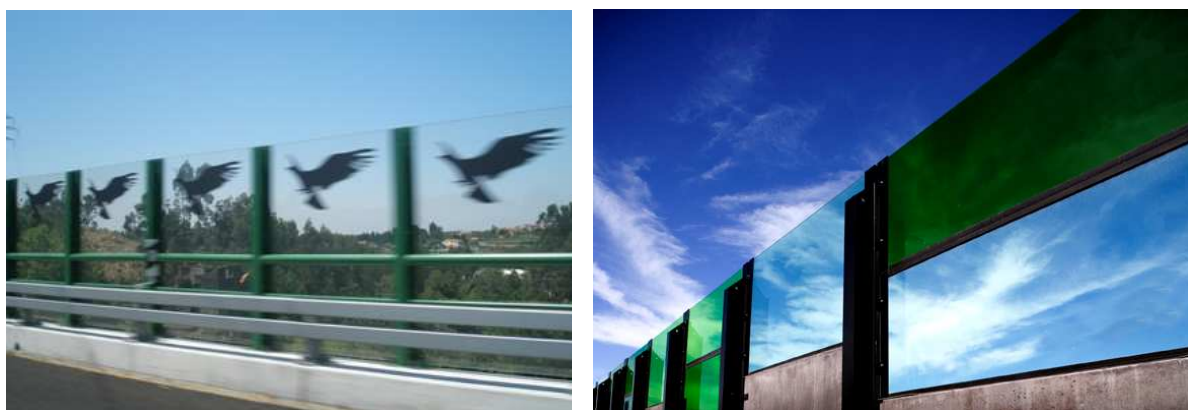


Fig. 58 – Efeitos criados para marcar a presença dos Painéis Transparentes

A utilização de painéis transparentes, nomeadamente de acrílico, em barreiras de protecção do ruído, apresenta também algumas desvantagens. A sua resistência mecânica está longe de ser a mesma de outro tipo de materiais usados em barreiras sonoras, nomeadamente o betão. Isto torna-a muito susceptível a actos de vandalismo, nomeadamente o riscar e o quebrar dos painéis (Fig. 59). A fraca resistência mecânica implica também que no caso de qualquer tipo de acidente ou despiste, estes painéis ofereçam muita pouca resistência, quebrando-se facilmente. Este facto é o motivo pelo qual geralmente a aplicação de painéis transparentes é acompanhada pela instalação na base dos mesmos de blocos de betão armado, que as proteja contra as agressões resultantes da utilização da via.

A manutenção da transparência, que permite a diminuição do impacto visual causado pelas barreiras sonoras, e que é a principal vantagem da aplicação deste tipo de painel, é também um aspecto problemático. Estes materiais costumam ser sensíveis contra as condições ambientais, nomeadamente aos raios ultravioleta. Quando não existe uma boa protecção contra os mesmos, estes poderão diminuir consideravelmente a transparências desde tipo de painéis. Os grafites é outro inimigo da transparência dos painéis e é um fenómeno demasiadamente comum em zonas de proximidade a centros urbanos, principalmente a áreas socialmente problemáticas. A superfície dos painéis poderá, no entanto, ser

sujeita a algum tipo de tratamento, que permita a mais fácil lavagem dos grafites resultantes do vandalismo.



Fig. 59 – Vandalismo em Painéis Transparentes (Fleming , G. et al, 2001)

Todo este tipo de considerações apontadas nos últimos dois parágrafos, torna evidente que a utilização de painéis transparentes em barreiras de protecção contra o ruído implica, em primeiro lugar, medidas de prevenção tomadas na produção dos painéis de forma a que as resistências aos vários tipo de agentes agressores sejam aceitáveis e, em segundo lugar, uma constante manutenção dos mesmos, nomeadamente a sua constante lavagem e substituição. Este tipo de necessidade traduz-se em custos elevados quer de investimento inicial, quer ao longo do tempo de utilização da obra, o que torna muitas das vezes a utilização de painéis transparente numa solução não viável do ponto de vista económico.

No entanto, a transparência é sem dúvida uma enorme vantagem a ser tomada em conta pelos designers das barreiras sonoras, pelo que têm vindo a surgir novas soluções para que sejam mais interessantes do ponto de vista económico. A principal ideia passaria pela utilização mista de painéis transparentes em simultâneo com outro tipo de painéis mais resistentes (Fig. 60 e 61). Esta é sem dúvida, uma solução interessante, permitindo que o campo visual não fique bloqueado a certas alturas, as quais deverão ser analisadas e determinadas com base nas zonas sensíveis ao impacto visual.



Fig. 60 - Barreiras Metálicas com Painéis Transparentes

Em geral, os painéis transparentes são colocados ou ao nível do campo de visão dos condutores, ou então no topo da barreira, para permitir um aumento do campo de visão dos residentes das zonas a proteger. Como os painéis transparentes nunca serão demasiadamente pesados, a sua colocação entre, ou no topo, dos painéis de outro tipo, não deverá causar grandes problemas estruturais.



Fig. 61 - Barreiras De Alvenaria com Painéis Transparentes

Esta solução não permite anular a totalidade das desvantagens da utilização de painéis transparentes, no entanto torna-os certamente menos susceptíveis ao vandalismo e a despistes. Por outro lado, como funciona em simultâneo com soluções mais económicas, diminui-se as despesas totais, visto serem necessárias menores quantidades de material transparente. O desempenho acústico poderá ser melhorado, caso seja inserido em painéis com capacidades absorventes.

No entanto, a utilização de painéis mistos, implica também o aumento da complexidade de produção e montagem dos mesmos, que pode traduzir-se negativamente em consequências temporais e económicas.

4.5.10. PAINÉIS PLÁSTICOS

Um tipo de solução pouco utilizado, mas que com o desenvolvimento de novos materiais poderá tornar-se numa boa alternativa, é a utilização de painéis que utilizem derivados do plástico (Fig. 62).

Este tipo de solução em tudo se assemelha à utilização de painéis metálicos, com a diferença que o caixão exterior destes será feito de algum tipo de plástico. Assim, o princípio de funcionamento deste tipo de painel consiste na existência de um exoesqueleto, furado, de plástico, que suporta um preenchimento de painéis semi-rígidos de algum tipo de lã mineral, nomeadamente lã de rocha ou lã de vidro. O seu exoesqueleto dá-lhes as capacidades mecânicas, enquanto o seu conteúdo confere-lhes as capacidades acústicas necessárias ao seu bom desempenho como isolador sonoro. (Sound Fighter, 2009)

O material plástico utilizado poderá ser o polietileno, o PVC e a fibra de vidro. Em geral o mais utilizado neste tipo de solução costuma ser o polietileno. (Fleming , G. et al, 2001)

A utilização do plástico neste tipo de infra-estrutura torna-se interessante, tendo em consideração que este material é muito versátil e moldável. Poderá ser produzido para se comportar e aparentar como quase qualquer outro tipo de material do mercado. É também 100% reciclável, característica que tem vindo a tomar cada vez mais importância no actual mundo da construção civil. Por fim, o seu baixo peso específico torna-o ideal para ser instalado sobre estruturas, quando necessário, como, por exemplo, pontes, sem implicar um aumento substantivo das cargas sobre a mesma.

A utilização de Plásticos poderá também traduzir-se em ganhos económicos significativos, ainda mais considerando que se trata de um material reciclável.

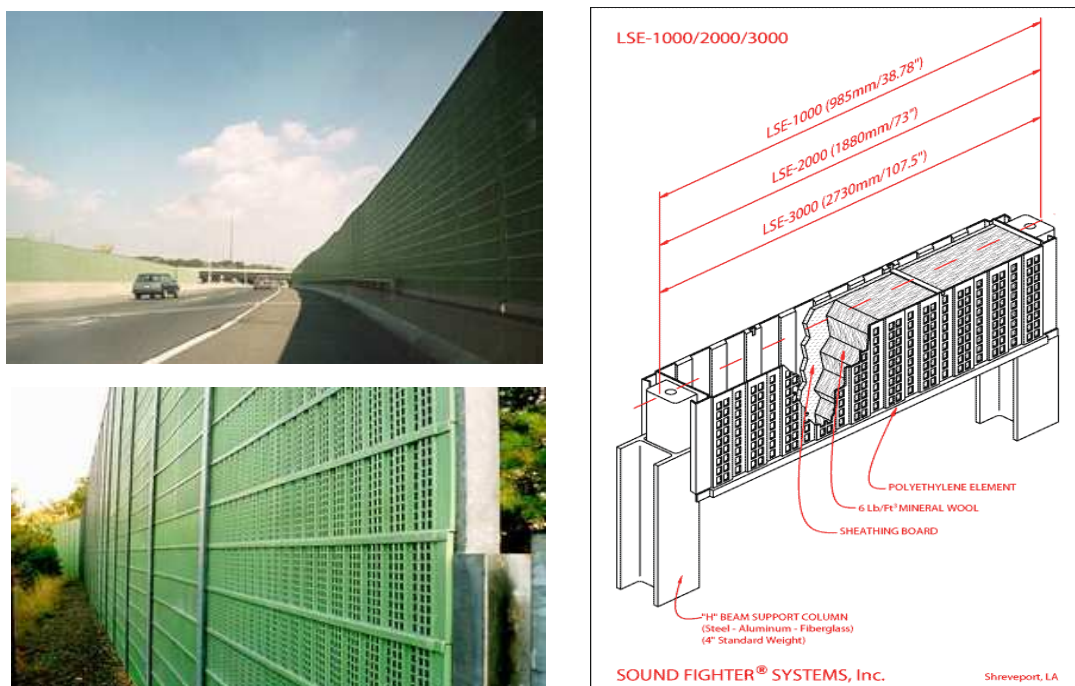


Fig. 62 – Barreira sonora com Painéis Plásticos (Sound Fighter, 2009)

Este tipo de solução apresenta, no entanto, várias desvantagens que deverão ser tomadas em conta no seu design. O plástico é um material muito susceptível à dilatação e contração resultantes de variações de temperatura. Tal poderá resultar em abertura de brechas que comprometam o desempenho acústico da barreira. Por outro lado, esta torna-se também numa solução muito susceptível ao vandalismo, nomeadamente a armas brancas e ao grafite. Um outro problema é a fácil degradação do plástico, como consequência da exposição deste aos raios ultravioleta, que terá consequências no aspecto estético, nomeadamente na cor, bem como no desempenho mecânico. Dever-se-á, portanto, ter o cuidado de se adicionar algum tipo de protecção química na fase de produção, de forma a que o plástico tenha desempenhos aceitáveis contra este tipo de agressão. O encadeamento poderá também ser algo que se deverá ser tomado em conta, sendo que determinados tratamentos de superfície deverão ser aplicados de forma a diminuir esta problemática de segurança à correcta utilização da via.

4.5.11. PAINÉIS DE BORRACHA RECICLADA

Este é outra aplicação pouco ortodoxa em barreiras de alta velocidade e consiste na utilização da borracha para se obter bons isolamentos acústicos (Fig. 63). A borracha poderá ter origem em várias fontes, mas as mais comuns são a reciclagem de pneus usados e dos desperdícios de fabricas de produção de produtos de borracha.

A borracha não tem geralmente a rigidez necessária para que possa ser considerada como um componente estrutural de um painel de uma barreira sonora. Assim, para ser aplicada na barreira esta tem que estar ligada a algum tipo de elemento rígido que lhe dê estabilidade. A borracha pode ser aplicada como um revestimento de, por exemplo, um painel de betão ou, então, ser fixada à volta de uma subestrutura metálica, criando subpainéis a serem empilhados entre postes.

As desvantagens da utilização de borracha em painéis para barreiras acústicas são, no entanto, muitas. Em caso de incêndio, este tipo de material criará uma chama veloz e quantidades de fumo que poderão ser extremamente problemáticos à segurança dos utentes da via e mesmo das zonas urbanas próximas. É muito susceptível ao vandalismo, nomeadamente a cortes, sendo que em caso de serem aplicados

grafites, a sua remoção é de extrema dificuldade. A borracha apresenta ainda fraca resistência aos agentes climáticos, tendendo a uma oxidação prematura quando exposta de forma prolongada aos elementos. Isto promove a desintegração da borracha, comprometendo o bom desempenho acústico dos painéis. Como se não bastasse, esta oxidação poderá também comprometer a saúde do betão, no caso de este ser utilizado como superfície revestida, o que poderá mesmo implicar a criação de problemas a nível estrutural. (Fleming , G. et al, 2001)

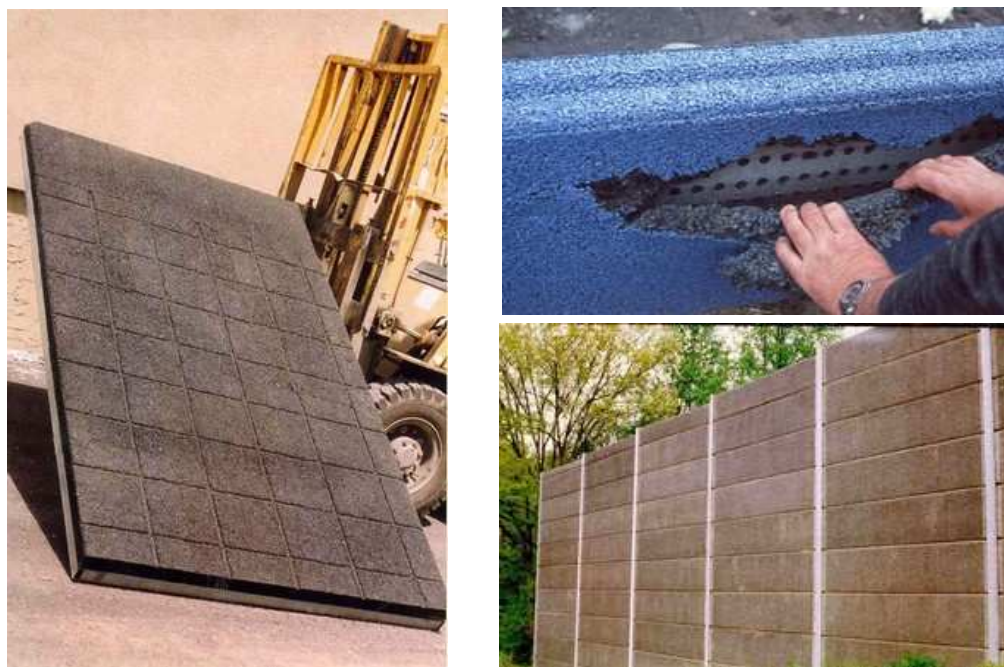


Fig. 63 – Painéis em Borracha Reciclada

Em termos de impacto visual, a borracha trás também grandes desvantagens. O seu tratamento estético reduz-se à sua coloração. No entanto, devido à sua sensibilidade aos elementos, geralmente essa degrada-se rapidamente, resultando num aspecto sujo e criando um impacto visual extremamente negativo.

Em relação ao seu desempenho acústico, pode-se geralmente conseguir bons resultados, mas mais uma vez dever-se-á ter muito cuidado com a possível degradação da borracha, que poderá alterar de forma considerável o comportamento expectável.

A borracha é ainda um material um pouco perigoso para ser aplicado a barreiras de protecção contra o ruído, no sentido que o seu comportamento nesse papel é ainda um pouco desconhecido. Isto não invalida, no entanto, o estudo mais aprofundado deste tipo de material, que tem potencial acústico e que, portanto, devidamente desenvolvido, poderá ser uma nova alternativa nas barreiras acústicas do futuro.

4.5.12. PAINÉIS REVESTIDOS COM ELEMENTOS CERÂMICOS

Já foram expostas várias soluções de utilização de painéis de betão com os mais variados tipos de revestimentos que permitam a absorção sonora. Esta é mais uma solução desse tipo, em que o revestimento, por sua vez, consiste na utilização de elementos cerâmicos que, pelas suas formas e baixas densidades, conferem graus de absorção sonora muito satisfatórios.

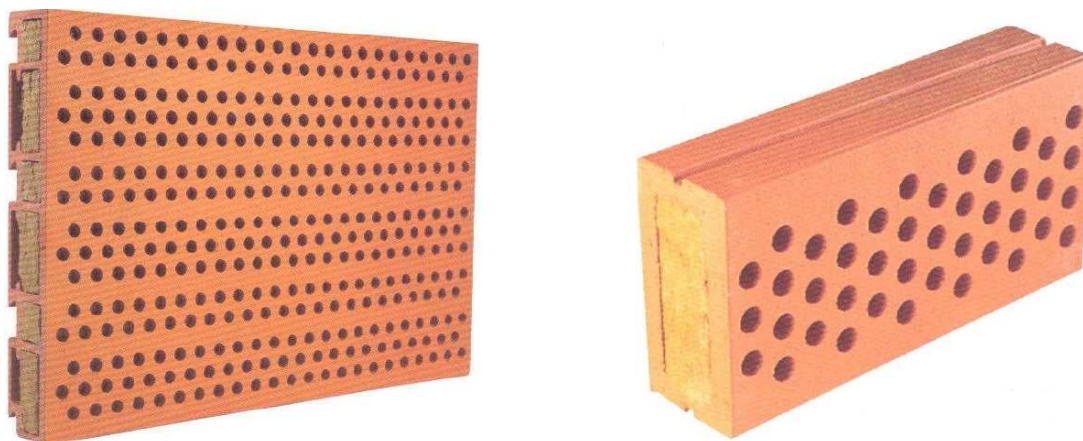


Fig. 64 – Exemplos de Revestimentos Cerâmicos. PHONBRICK a esquerda e Acoustic Brick à direita (Guiraud Freres, 2009)

Geralmente os blocos possuem várias cavidades, e podem ser preenchidos por algum tipo de material fibroso que lhes confira ainda melhores índices de absorção acústica.

Os blocos cerâmicos poderão ser colados aos painéis ou, então, ligados a estes através de elementos metálicos lineares.

Outro interessante tipo de solução é a aplicação de um revestimento directamente no painel com algum tipo de material fibroso, acusticamente absorvente, e a posterior colocação sobre este dos azulejos cerâmicos que permitam, por um lado, a protecção desse revestimento e, por outro, a melhoria do isolamento acústico.

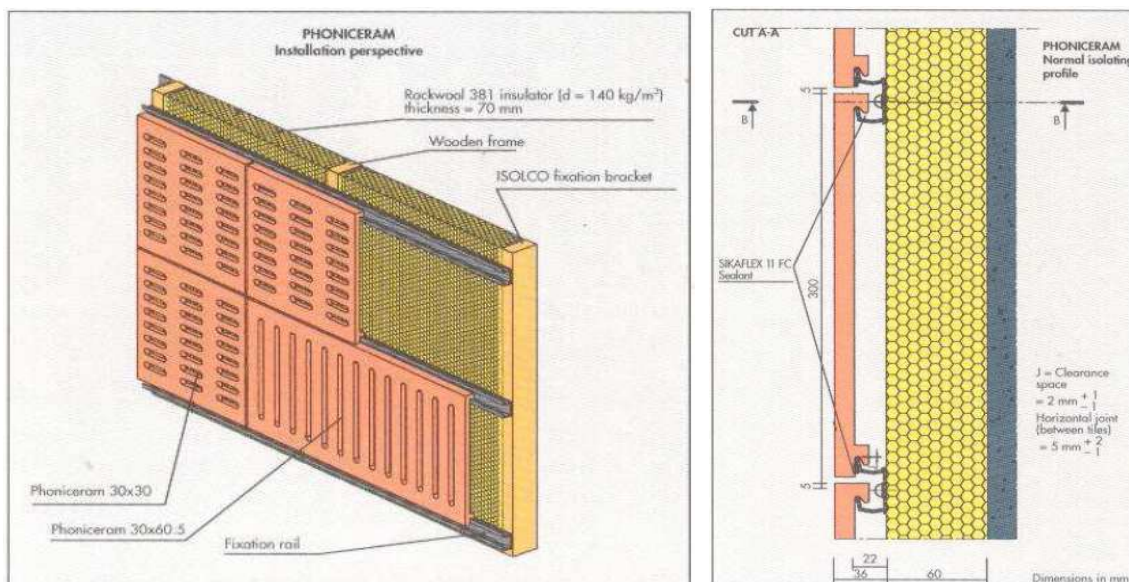


Fig. 65 – Azulejo Cerâmico do tipo PHONI CERAM (Guiraud Freres, 2009)

É também possível a utilização de blocos cerâmicos não como revestimento, mas como elemento estruturante do próprio painel. Neste caso, os blocos-painel deverão ter a largura suficiente para se apoiarem entre postes e serem suficientemente resistentes para que sejam empilhados até se obter a altura de barreira pretendida.

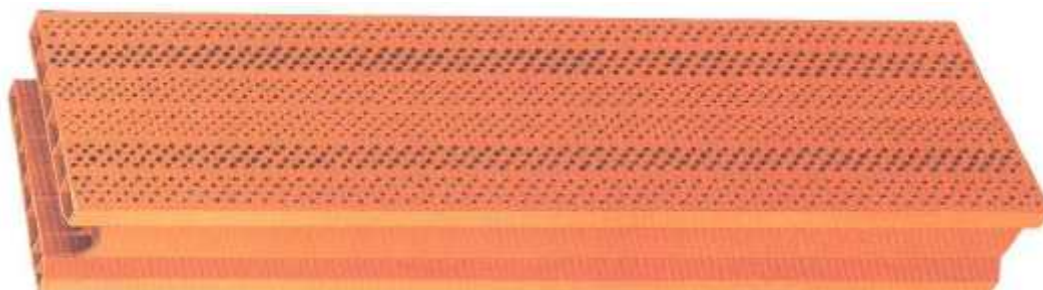


Fig. 66 – Bloco Cerâmico PHONI CERAM (Guiraud Freres, 2009)

Em relação ao desempenho acústico, como foi já dito, esta solução resulta geralmente em isolamentos muito satisfatórios, principalmente para médias frequências, variando obviamente com o tipo de bloco cerâmico a utilizar.

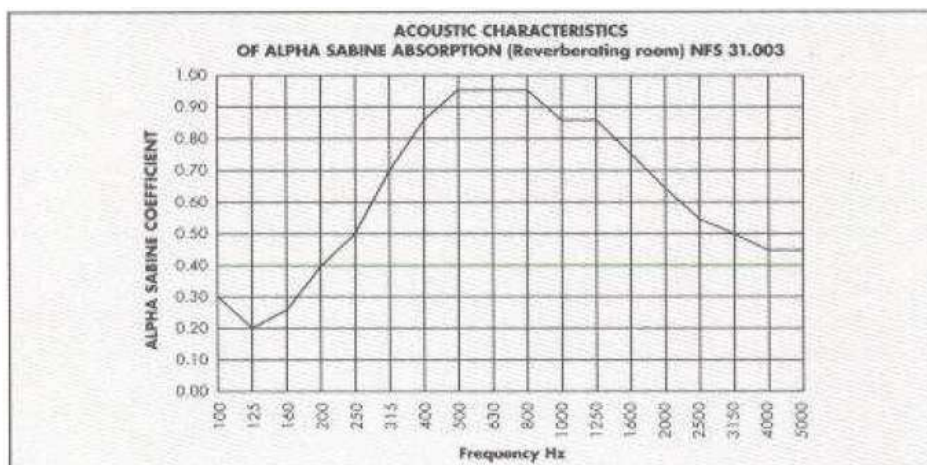


Fig. 67 – Coeficiente de Absorção Sonora do bloco PHONI CERAM (Guiraud Freres, 2009)

A resistência ao vandalismo obtida com este tipo de solução não é, no entanto, boa, visto que em certos casos os blocos cerâmicos tornam-se facilmente quebradiços, expondo o enchimento fibroso, e colocando em causa o bom isolamento acústico proporcionado pela barreira.

A montagem deste tipo de barreira poderá também tornar-se numa desvantagem da sua utilização, como consequência da sua relativa complexidade, nomeadamente no processo de instalação do revestimento.

Os baixos custos e os óptimos desempenhos acústicos fazem, no entanto, dela numa alternativa a ser tomada em conta na decisão da solução a utilizar.

4.5.13. BARREIRAS DE ALVENARIA

Até agora sempre se falou em soluções do tipo poste-painel para a instalação de barreiras sonoras. As alvenarias, no entanto, não se integrarão neste grupo, visto comportar-se mais como muro auto-sustentável, em que o peso será o elemento estabilizador.

As capacidades acústicas de alguns tipos de alvenaria são, desde há muito, bem conhecidas, pelo que a sua utilização em barreiras sonoras acontece de forma natural. Os blocos da alvenaria poderão ter origem cerâmica ou, então, betuminosa (Fig. 68).



Fig. 68 – Barreiras Acústicas de Alvenaria, de origem cerâmica à esquerda e betuminosa à direita

A barreira deverá assentar sobre uma fundação de configuração contínua de betão armado. Costuma ser também necessário proceder-se a um reforço da alvenaria através de armação apropriada. A barreira deverá ainda possuir pontualmente elementos verticais de maior rigidez que funcionem como pilares.

O preenchimento das alvenarias é geralmente efectuado manualmente em obra, apesar de existir a possibilidade da montagem dos painéis em fábrica, que poderá ser feita de forma automática, e transportada para o local de instalação e aí integrada na barreira.

As barreiras de alvenaria poderão funcionar como barreiras absorventes ou reflectoras em relação à propagação do ruído. A diferença entre elas terá a ver com a densidade dos blocos de alvenaria.

Para se obter uma barreira reflectora, os blocos de alvenaria deverão ter elevadas densidades, pelo que se utilizam blocos maciços, normalmente cerâmicos. As superfícies deverão ser lisas.

De forma a que o comportamento seja absorvente, os blocos de alvenaria deverão ser formados por rugosidades e cavidades de formas específicas, que poderão ou não ser ainda preenchidas por algum tipo de material absorvente como lã de rocha. É muito usual que este tipo de bloco seja de origem betuminosa, normalmente de algum tipo de betão leve, no entanto os cerâmicos são também usados com relativa frequência.

Em Portugal, a utilização do tijolo maciço para se obter barreiras do tipo reflectoras é pouco usual, no entanto encontram-se facilmente ao longo das vias vários tipos de barreiras de alvenaria absorventes, e as soluções de blocos a usar neste tipo de alvenaria são imensas (Fig. 69 e 70).

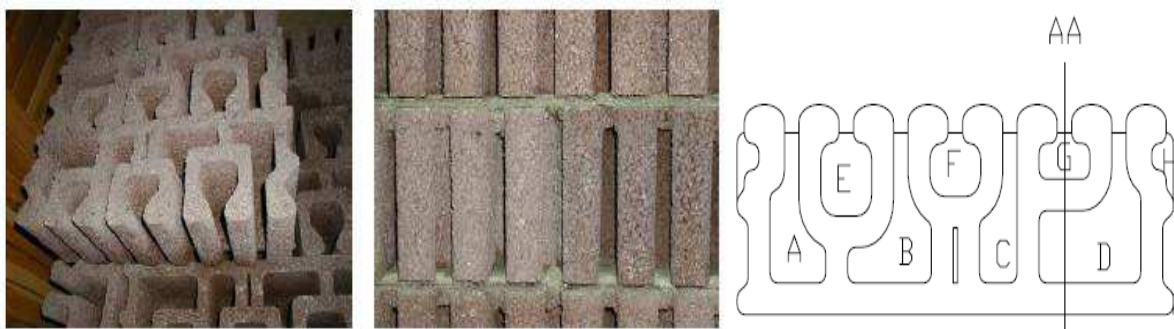


Fig.69 – Exemplo de bloco de alvenaria em betão leve para barreiras do tipo absorvente (Leca® Sound Comfort)



Fig. 70 – Bloco desenvolvido pela Faculdade de Engenharia da universidade do Porto (maxit ISOLSÓNICO®, 2003)

As capacidades de absorção sonora de barreiras de alvenaria variam muito tendo em consideração o tipo de bloco a usar nas mesmas, no entanto geralmente este tipo de solução garante uma performance acústica muito boa, em especial para altas frequências.

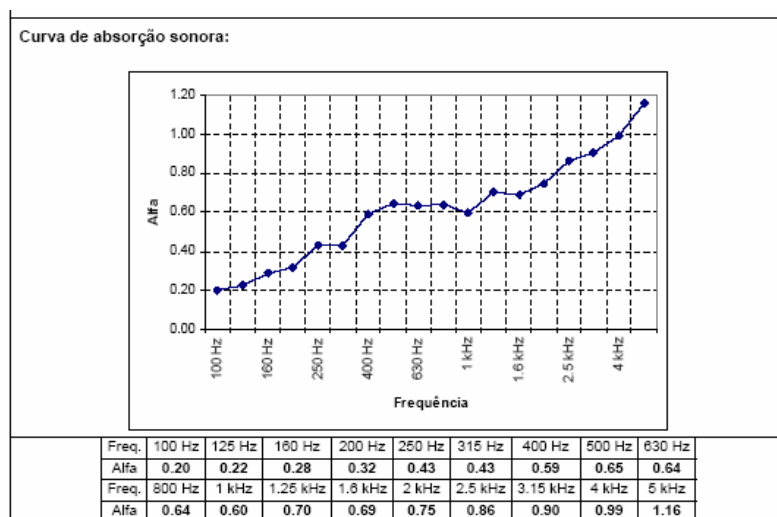


Fig. 71 – Coeficientes de absorção sonora a_s para o bloco de alvenaria Leca® Sound Confort (MELO, A.,2007)

Este tipo de solução, além do bom desempenho como isolador sonoro, apresenta outro tipo de vantagens que a poderão tornar numa boa opção de mitigação ao ruído em vias de comunicação. Normalmente, as barreiras de alvenaria são mais facilmente aceites em termos estéticos pela comunidade em que se inserem, do que, por exemplo, no caso do betão ou de barreiras metálicas. Em termos de equipamentos de transporte e montagem, as exigências não são muitas, e o custo dos materiais é em regra geral baixo.

As desvantagens da utilização de alvenarias prendem-se principalmente na morosa montagem que as caracteriza, que se traduz em grande necessidade de mão de obra e de tempo na instalação da barreira. Esta desvantagem traduz-se em perdas económicas significativas, tornando-se uma solução inviável para a instalação de barreiras sonoras demasiadamente longas. A utilização de painéis de alvenaria já preenchidos em fábrica poderia ser a solução, no entanto levanta grandes problemas de transporte como consequência do seu peso seu peso elevado e da muito fraca resistência a tracções.

A robustez necessária das barreiras de alvenaria para o seu bom desempenho estrutural poderá ser outra desvantagem, sendo que em termos gerais as barreiras caracterizam-se por elevadas espessuras, na ordem dos 30 a 50 cm. A sua resistência a tracções e a efeitos dinâmicos é baixa, enquanto que a sua susceptibilidade ao vandalismo é elevada. Os grafites são um aspecto problemático, sendo que a sua remoção é de dificuldade extrema, principalmente no caso de existência de superfícies rugosas.



Fig. 72 – Exemplo de Grafites em barreiras de alvenaria

A conclusão a que se chega é que a utilização de alvenarias em barreiras de protecção contra o ruído é interessante, mas apenas nos casos em que a sua aplicação não implica prolongamentos demasiadamente longos ao seu comprimento.

4.5.14. PAINÉIS DE BETÃO ARMADO EM CONSOLA

Já foi aqui abordado a utilização de betão armado em barreiras de protecção contra o ruído, no entanto em forma de painel apoiado entre postes. Esta não é, no entanto, a única solução em betão armado para barreiras sonoras, e algumas das vezes sugere-se a utilização de painéis de betão armado que funcionem em consola (Fig. 73).

Este tipo de solução consiste então em painéis pré-fabricados, transportados até ao local de instalação, mas que se ligam não aos postes, mas directamente nas fundações descarregando sobre estas. A ligação entre painel e fundação deve ser feita através de armaduras a dimensionar (Fig. 74). (Fleming, G. et al, 2001)

As barreiras deste tipo, poderão igualmente funcionar como absorventes, através da instalação de qualquer tipo de revestimento com capacidade de absorção acústica, ou por sua vez funcionar como reflectora, no caso de não existir qualquer tipo de tratamento de superfície.



Fig. 73 – Painéis de Betão Armado Não Apoiados por Postes

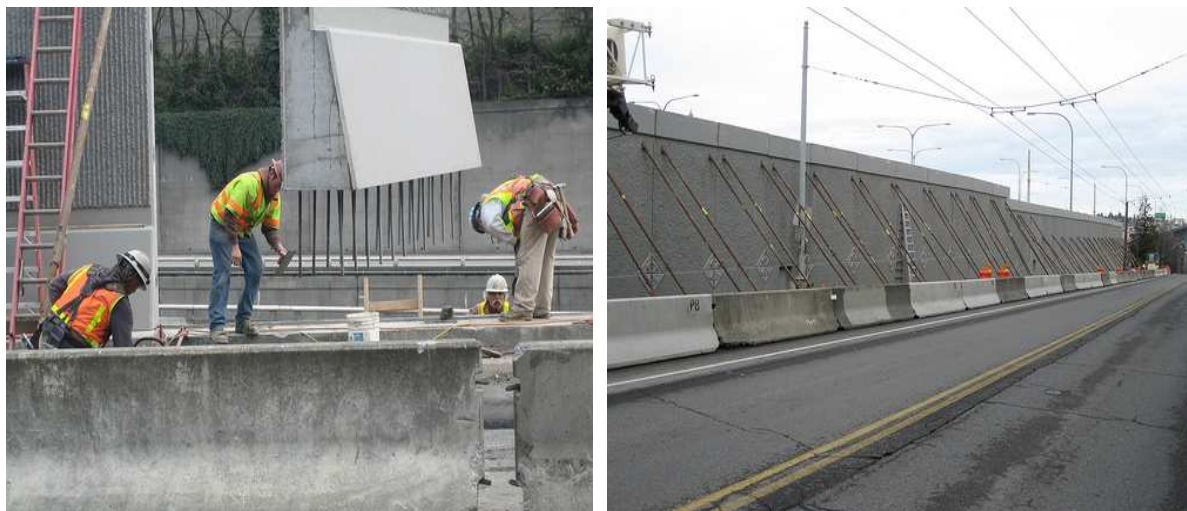


Fig. 74 – Instalação dos Painéis de Betão Armado sobre a Fundação

Este tipo de solução resulta geralmente em barreiras com maiores resistências estruturais. A análise dos momentos críticos deixa de ser feita sobre os eixos horizontais, nomeadamente a meio do vão entre postes, passando a ser sobre os eixos verticais, encontrando-se o seu máximo ao nível do encastramento com a fundação, funcionando o painel como uma consola. Este tipo de esquema estrutural traduz-se normalmente numa maior robustez deste tipo de solução em relação aos painéis apoiados entre postes. Normalmente são necessárias espessuras relativamente maiores ao longo de toda a base do painel para que os momentos criados pelo encastramento sejam resistidos, enquanto que com a utilização de painéis entre postes, esta rigidez extra seria garantida por estes.

A vantagem deste tipo de painel auto-sustentável poderá estar, por um lado, na maior resistência estrutural e, por outro no maior índice de pré-fabricação da barreira, eliminando a necessidade de instalação de postes, que se traduzirá numa maior rapidez de montagem da barreira.



Fig. 75 – Barreiras em forma de zig-zag (Fleming , G. et al, 2001)

A utilização de painéis tão robustos poderá, no entanto, levantar grandes problemas logísticos, nomeadamente ao nível das exigências dos equipamentos de transporte e instalação. Outros problemas poderão surgir nas juntas verticais entre painéis, que poderão não se encontrar suficientemente apertadas para garantir o correcto isolamento acústico. Mesmo com todo o cuidado na instalação, estas juntas poderão representar problemas acústicos devido a fenómenos de deformação, causados, por

exemplo, por variação e diferenciais de temperatura, cura do betão, fluência e retração, e mesmo até pelas cargas e assentamentos que poderão vir a ser sujeitos. Aconselha-se então a aplicação de algum tipo de material elástico entre painéis de forma a diminuir as consequências destes efeitos.

É possível, e recorre-se muitas vezes, à utilização da forma da linha de implementação deste tipo de barreiras sonoras, de forma a se obter uma maior estabilidade estrutural através do aumento da inércia da barreira na direcção de deformação. Isto será possível, por exemplo, com a utilização de barreiras de forma em zig-zag (Fig. 75). Os painéis neste caso deverão estar de alguma forma ligados entre si. (Fleming, G. et al, 2001)

Esta solução implica, no entanto, um aumento significativo do comprimento total da barreira, que poderá significar um aumento dos custos de construção da mesma. Por outro lado, a maior estabilidade estrutural poderá traduzir-se no aligeiramento da mesma, pelo que a análise económica para esta alternativa deverá ser feita com muito cuidado.

4.5.15. PAINÉIS DE BETÃO ARMADO COM PILARES INTEGRADOS

Um outro tipo de solução bastante interessante acerca da utilização de painéis de betão armado sem ligação a postes é a integração de pilares nos próprios painéis pré-fabricados (Fig. 76).



Fig. 76 – Painéis de Betão Armado com Pilares Integrados (WSDOT, 2009)

Esta alternativa descarta a necessidade de uma sapata contínua, visto a ligação dos painéis à fundação poder ser feita pontualmente na zona dos pilares. Assim, as barreiras deixam de funcionar como consola num todo, passando o painel a descarregar no pilar sendo os esforços transmitidos à fundação através deste. Este esquema estrutural difere do poste-painel na ligação do painel ao poste, porque fazendo os dois parte do mesmo, a ligação funcionará como um encastramento, enquanto que no caso do poste-painel, sendo o painel apenas encaixado no poste, a rotação será livre. Este encastramento entre poste e painel implica o estudo de um novo fenómeno no pilar, que será a torção exercida neste pelos esforços no painel.

A ligação entre pilar e a fundação poderá de igual forma ser feita por encastramento através da continuidade de armaduras, ou então através do aparafusamento (Fig. 78). Esta última opção traduz-se num aumento da rapidez de instalação pelo que se torna interessante, particularmente nestes casos, pois como o pilar faz parte do próprio painel, o alinhamento e a correcta verticalidade durante a betonagem da ligação com as fundações seriam bem mais difíceis de conseguir, pois neste caso seria necessário firmar a totalidade do painel.

Para não comprometer o desempenho acústico nas juntas verticais entre painéis, os pilares deverão ter uma forma específica de modo a que o de um lado encaixe no de outro lado. Desta forma os painéis encaixarão entre si de forma simples, garantindo o correcto isolamento acústico.



Fig. 77 – Instalação dos Painéis de Betão Armado (WSDOT, 2009)

Em relação ao desempenho acústico e tratamentos estéticos, tratando-se de um painel em betão armado, serão exactamente iguais a qualquer outro tipo de painel deste material. Pode-se ou não proceder ao revestimento da barreira de forma a torná-la do tipo absorvente ou reflectora. Pode-se ou não criar texturas, desenhos e cores na superfície da barreira de forma a enquadrar de melhor forma no contexto em que se insere.

4.5.16. BARREIRAS PLANTADAS

As barreiras plantadas consistem em barreiras constituídas por uma estrutura exterior normalmente de betão, que forma um exoesqueleto para um preenchimento de solo. (Fleming , G. et al, 2001)

A estrutura que forma o exoesqueleto é normalmente formada por inúmeras cavidades de tamanho razoável (Fig. 78), permitindo a exposição do solo de preenchimento. Isto permite e é usado para se proceder á plantação de vegetação, geralmente de flor, ao longo de toda a altura da barreira. Esta característica única deste tipo de barreiras poderá permitir a diminuição do impacto visual causado pela construção da mesma.

O isolamento sonoro, por sua vez, é garantido pelo preenchimento de solo, solo esse que deverá ser escolhido conforme a atenuação que se queira obter.



Fig. 78 – Barreiras Plantadas

Apesar de esta solução à partida poder ser interessante, dando um ar natural à necessidade da protecção contra a propagação do ruído, existem vários factores que a põem em causa. Por um lado, a boa aparência estética obtida através da plantação de vegetação é no mínimo discutível. Por outro lado, essa mesma vegetação implica uma manutenção constante e dispendiosa. A capacidade acústica da terra é também duvidosa devido à sua difícil homogeneização e ao pouco estudo acústico acerca da mesma. A utilização do solo poderá ser também perigosa, nomeadamente com o movimento de águas provenientes, por exemplo, das chuvas, que poderão causar derrocadas, ou apenas pequenas aberturas que comprometam o bom isolamento ao qual a barreira se propõe.

4.5.17. BARREIRAS DE PEDRA

Esta é outra arrojada solução de aplicação às barreiras acústicas, e consiste na aplicação de agregados de pedra confinados por uma estrutura de rede metálica em forma de caixa, que deverão ser empilhadas de forma a formarem a barreira (Fig. 79)



Fig. 79 – Barreiras de pedra (Fleming , G. et al, 2001)

Este tipo de solução, já utilizada com outro tipo de objectivo como, por exemplo, retenção de terras, é caracterizada pela sua elevada resistência mecânica. No entanto, a sua estabilidade estrutural é obtida através do seu peso próprio, isto implica serem geralmente também caracterizadas por uma robustez elevada, podendo a base chegar a espessuras de vários metros.

Poderá tornar-se numa solução interessante tendo em consideração o bom resultado estético que dela advém, enquadrando-se muito bem em contextos naturais. No entanto, em termos económicos a utilização simples de pedra é bem menos interessante do que, por exemplo, a utilização do betão, pelo que a aplicação desta solução deve ser feita apenas em trechos curtos, tornando-se economicamente inviável quando a barreira se prolonga demasiado.

Em termos acústicos, a barreira funcionará mais como dispersor das ondas sonoras, no entanto a sua capacidade de isolador sonoro é duvidosa e difícil de garantir. O desempenho acústico da barreira poderá variar muito conforme o tipo de pedra, as suas dimensões e graus de compactação dos agregados a utilizar na mesma.

4.6. BOAS PRÁTICAS NA INSTALAÇÃO DE BARREIRAS SONORAS

O investimento na instalação de barreiras sonoras, como medida de mitigação do ruído viário, torna-se inútil quando o isolamento sonoro que é pretendido não é obtido por negligência. Assim a sua

instalação deverá proceder-se de forma cuidada e rigorosa de forma a evitar existência de aberturas ao longo da barreira, sendo que mesmo as mais pequenas poderão implicar uma redução significativa da eficácia de isolamento.

Quadro 4 – Redução da perda na transmissão em função da percentagem de aberturas (HK Government, 2003)

% da área ocupada pelas aberturas	Perda na Transmissão sem falhas a 500 Hz			
	10 dB	15 dB	20 dB	25 dB
↓ redução da perda na transmissão, dB ↓				
50	10+	15+	20+	25+
25	10	15	20	25
13	8	12	17	22
6	5	10	14	19
3	4	7	11	16
1.5	2	5	9	13
0.78	1	3	6	10
0.39	1	2	4	8
0.20	0	1	3	5
0.10	0	1	1	4
0.05	0	0	1	2

Verifica-se de facto pela análise do quadro 4 que aberturas apenas na ordem dos 1% poderão representar reduções de cerca de mais de 10 dB, que é de facto uma quantidade de pressão sonora muito significativa, que poderá marcar toda a diferença em relação ao cumprimento das normas regulamentares a serem cumpridas pela instalação da barreira.

Aqui serão então expostas algumas das regras básicas a serem cumpridas ao longo da instalação das barreiras de forma a serem garantidos os bons desempenhos de isolamento sonoro que se pretende obter com a implementação das barreiras acústicas.

4.6.1. ESCOAMENTO DE ÁGUA

O projecto dos vários mecanismos de escoamento de água poderá implicar a necessidade de a linha de escoamento atravessar a barreira (Fig. 80). E este é, de facto, muita das vezes um factor preponderante em relação ao mau comportamento na construção das barreiras sonoras.



Fig. 80 – Aberturas em barreiras resultantes de mecanismos de escoamento de águas.

O que se deverá tentar fazer é diminuir estas aberturas ao mínimo, o que poderá nem sempre ser possível devido ao caudal que seja necessário escoar. Outra solução, ainda mais correcta, seria proceder ao escoamento de forma subterrânea, o que não implicaria a criação de aberturas na barreira propriamente dita.



Fig. 81 – Bons Comportamentos no Escoamento de Águas (Durisol, 2009)

Uma solução interessante poderá ser, quando os desníveis o permitem, o escoamento através do próprio painel. Isto torna-se possível através da inclinação de um dos subpainéis, criando uma abertura, que sendo vertical, não cria problemas significativos em relação ao isolamento em relação às ondas sonoras, que não se propagam a tal ângulo.

Este tipo de configuração poderá em certos casos ser difícil de alcançar, pois, sabendo que a água não segue o caminho que queremos, resume-se tudo aos desníveis. Pelo que tais considerações acerca do bom comportamento acústico da barreira deverão ser tidas em conta desde logo no projecto dos mecanismos de escoamento pluvial de forma a que os problemas possam ser resolvidos de raiz e não em cima da mesa na altura de montagem da barreira.

4.6.2. EQUIPAMENTOS AO LONGO DA LINHA DA BARREIRA

Será óbvio concluir que no caso da necessidade de instalação de equipamentos ao longo da linha da barreira sonora, esta última não poderá obviamente ser interrompida de forma a criar o espaço necessário à instalação dos mesmos, visto tal resultar na perda total do isolamento sonoro pretendido nas zonas da envolvente dessa mesma interrupção.

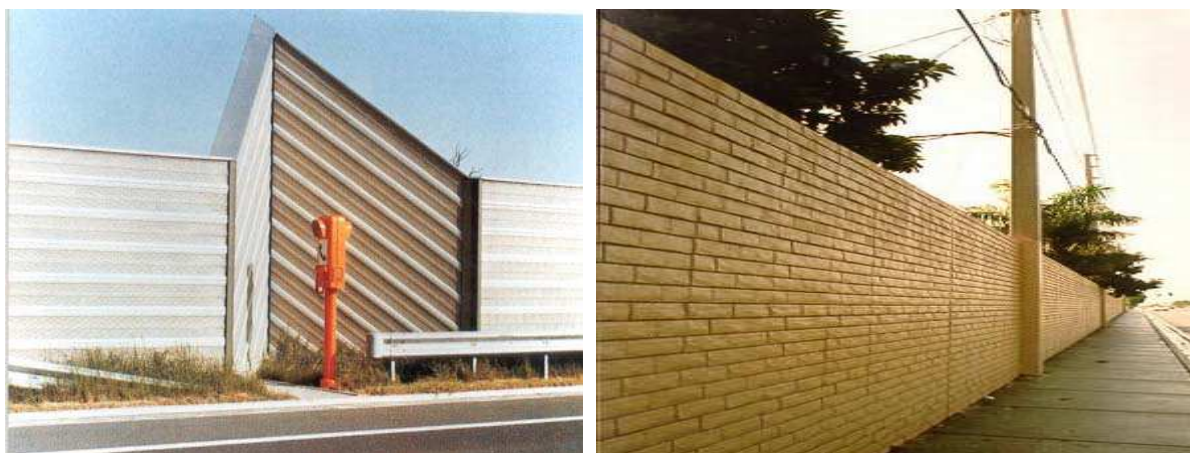


Fig. 82 – Integração dos equipamentos ao longo da linha da barreira

Desta forma, o que deverá de facto acontecer é alterar-se a configuração da barreira de forma a que estes equipamentos sejam contornados pela mesma, de forma a fornecer o necessário espaço às suas correctas utilizações (Fig. 82).

No caso de postes e sinais de trânsito, estes poderão facilmente ser integrados na própria barreira, de forma a que não seja necessário a alteração da configuração desta ao longo da sua linha de instalação (Fig. 82).

Verifica-se que muitas das vezes haveria claramente o espaço necessário entre a barreira e a via para a instalação destes mesmos equipamentos sem ser necessária a alteração da primeira ou então a integração dos elementos nesta. No entanto, estas soluções permitem também tirar melhor rendimento desse mesmo espaço, libertando, por exemplo, possíveis passeios de obstáculos à correcta acessibilidade.

4.6.3. SELAGEM DAS JUNTAS

As juntas são naturalmente um ponto crítico em termos do correcto isolamento acústicos das barreiras sonoras (Fig. 83).



Fig. 83 – Juntas em Barreiras Sonoras

Sendo as barreiras maioritariamente constituídas por elementos pré-fabricados que se unem entre si, a existência de várias juntas será inevitável. Existem, no entanto, várias medidas com o objectivo de proceder ao correcto isolamento destas mesmas juntas, de forma a não comprometer o desempenho da barreira.

Em primeiro lugar deve-se tentar que na montagem dos vários elementos da barreira, essas mesmas juntas fiquem o mais apertadas possível. No entanto, fenómenos como, por exemplo, a contracção dos painéis, torna esta medida insuficiente. Assim, dever-se-á colocar, algum tipo de material elástico nas juntas, de forma a estas adquirirem o isolamento pretendido.

Em barreiras metálicas ou de origens plástica, a aplicação de algum tipo de borracha entre painéis ou entre painéis e postes é o procedimento mais correcto. No caso de barreiras em betão armado a aplicação de mastique é largamente utilizada para selagem das juntas. Em ambos os casos, as suas aplicações deverão ser cuidadas, de forma a que a selagem seja feita em perfeitas condições, garantido a sua perfeita aderência aos elementos.

4.6.4. BASE DA BARREIRA

É muito usual verificar-se que a base das barreiras muitas das vezes não se encontra devidamente acondicionada ao terreno. Isto cria pequenas alturas entre o terreno e o painel sem qualquer tipo de

protecção contra a propagação das ondas sonoras (Fig. 84), o que é problemático ao correcto funcionamento da barreira.



Fig. 84 – Incorrecto Acondicionamento da Base do Painel com o Terreno

A utilização de sapatas contínuas é vantajoso neste aspecto, pois desta forma, os painéis apoiando-se sobre ela, a correcta selagem da base da barreira é quase que automaticamente garantida. Quando os painéis se apóiam apenas nos blocos de fundação sob os pilares, este objectivo é mais difícil de ser atingido.

No caso de não existir nenhum elemento entre a base da barreira e o terreno dever-se-á ainda ter em consideração a possível ocorrência de erosão do terreno que poderá dever-se a, por exemplo, movimentos de água, resultantes de uma má drenagem pluvial.

Esta é uma das razões pelas quais se aconselha a utilização de elementos em betão armado na base das barreiras entre pilares.

4.6.5. DESCONTINUIDADES E EXTREMIDADES

Poderá por vezes existir a necessidade de interrupções ao longo da linha da barreira, nomeadamente devido a incompatibilidades topográficas, dando origem a descontinuidades. O tratamento dessas descontinuidades deve ser feito com cuidado de forma a garantir que as mesmas não provoquem falhas no isolamento sonoro.



Fig. 85 – Descontinuidades em Barreiras Sonoras

As discontinuidades em barreiras sonoras são muitas das vezes também usadas de forma a permitir a passagem de pessoal através delas, sem comprometer o desempenho acústico.

Existe, pois um conjunto de regras que devem ser cumpridas de forma que não exista propagação de ruído significativo ao longo das discontinuidades.

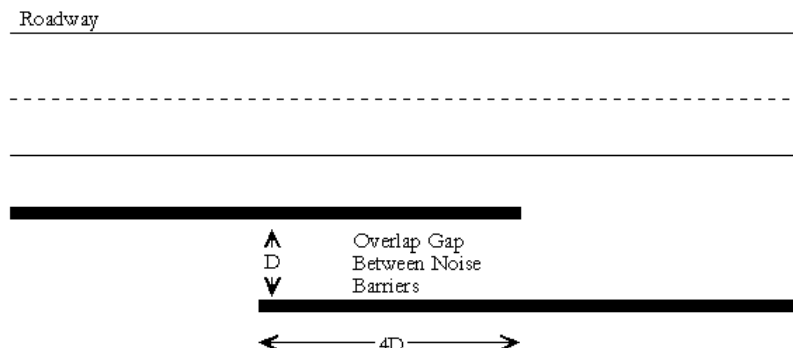


Fig. 86 – Regra a utilizar em descontinuidades (Fleming, G. 2001)

A principal regra tem a ver com as medidas da sobreposição das barreiras na zona da descontinuidade, e será obvio que o prolongamento dessa sobreposição terá a ver com a distância entre as barreiras, sendo que quanto mais afastadas elas se encontrarem, mais facilmente o som se propagará entre elas. Assim, em regra geral, deve-se garantir um prolongamento de sobreposição igual a 4 vezes a distância entre barreiras (Fig. 86).

É também fortemente aconselhável a utilização de materiais ou revestimentos absorventes em pelo menos uma das barreiras, do lado interior na sobreposição. Tal deve-se ao facto da ocorrência de fenômenos de reflexões múltiplas entre barreiras reflectoras paralelas, que poderá facilitar a propagação do ruído ao longo da sobreposição, expondo o receptor a proteger.

Um outro aspecto a ter em conta é a extremidade da barreira, nomeadamente até onde se deverá prolongar a mesma de forma a ser garantida a protecção do último receptor sensível contra o ruído refractado pelas extremidades.

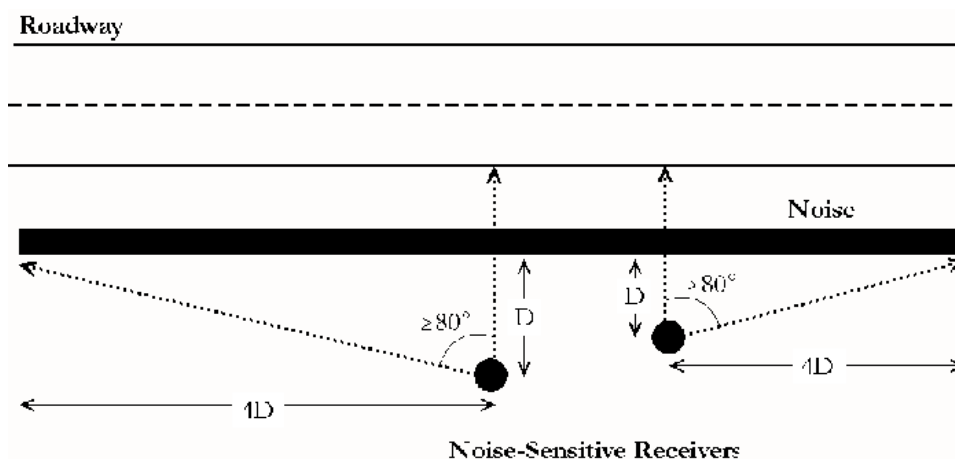


Fig. 87 – Prolongamento entre o receptor e a extremidade da barreira (Fleming, G. 2001)

Neste caso a regra será, da mesma forma, o prolongamento da barreira 4 vezes a distância perpendicular, neste caso entre o receptor e a mesma barreira. Outra regra, muitas vezes utilizada, é a

de garantir um ângulo maior de 80° entre o cateto criado pela distância entre o receptor e a barreira, e a hipotenusa formada pela distância entre o receptor e a extremidade da mesma (Fig. 87).

4.6.6. ABERTURAS PARA EQUIPAMENTO E MANUTENÇÃO

A implementação de barreiras sonoras implica automaticamente a criação de uma divisão de espaços. Por vezes poderá ser necessária a união desses mesmos espaços, o que implica a criação de aberturas ao longo da barreira.



Fig. 88 - Aberturas de Acesso em Barreiras Sonoras

A instalação de aberturas de acesso poderá ser essencial à necessária manutenção da barreira, e estas deverão ter a largura necessária à passagem do equipamento que se ache necessário à execução dessa mesma manutenção (Fig. 89). Não deveram acessíveis ao uso público, e devem-se encontrar sempre fechadas, quando não estão a ser utilizadas.



Fig. 89 – Aberturas criadas pela Instalação de Equipamentos

A criação de outros tipos de aberturas poderá ser também necessária, nomeadamente para a instalação de vários tipos de equipamentos (Fig. 89) que se achem necessários à correcta e segura utilização da

via em questão. São exemplos, os equipamentos de segurança, como bocas de incêndio, e os equipamentos eléctricos.

Todos estes tipos de aberturas deverão ser cuidadosamente projectados para que sejam perfeitamente seladas de forma a que não comprometam o correcto isolamento acústico da barreira de protecção contra o ruído.

4.7. O FUTURO DAS BARREIRAS SONORAS

Desde o seu aparecimento, as barreiras sonoras têm assistido a um elevado ritmo do seu desenvolvimento, ritmo esse que não parece dar sinais de abrandamento. Com as novas preocupações com os impactos ambientais e visuais, e com as alterações arquitectónicas das cidades, surgiram novos tipo de soluções, já postas em prática, ou que ainda não passaram do papel, que de tão inovadoras que são, se tornam no mínimo surpreendentes.

4.7.1. INOVAÇÃO ARQUITECTÓNICA

Já foi várias vezes referido o papel preponderante que o impacto visual e o enquadramento arquitectónico assumem hoje em dia em relação à instalação de barreiras sonoras, principalmente no interior de centros urbanos. Estes factores tornaram o aspecto arquitectónico um dos mais sujeitos aos recentes desenvolvimentos na área das barreiras sonoras.

Um óptimo exemplo de até onde a inovação arquitectónica poderá chegar é a imponente barreira sonora localizada em Utrecht, Holanda (Fig. 90).

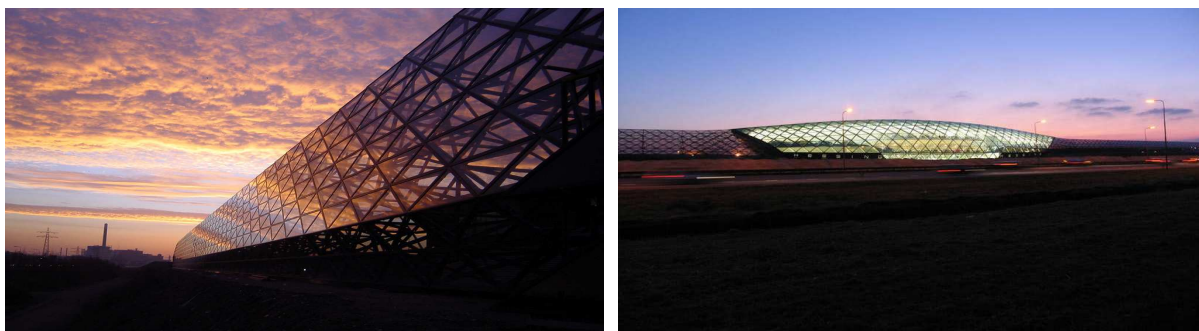


Fig. 90– Barreira Sonora de Utrecht (ONL, 2009)



Fig. 91 – Instalação da Barreira Sonora de Utrecht (ONL, 2009)

A barreira consiste numa estrutura metálica, constituída por elementos verticais ligados às fundações, os quais apoiam painéis pré-fabricados com configuração em treliça metálica (Fig. 91). Os painéis são preenchidos por pequenos elementos transparentes de geometria triangular.



Fig. 92 – Pormenores da Barreira Sonora de Utrecht (ONL,2009)

A barreira é baseada numa ideologia arquitectónica não ortodoxa onde a excepção é a regra. É constituída por diversos pormenores únicos que a tornam muito interessante. É de tal exemplo a configuração de uma das suas extremidades que acaba num bico suspenso, e das escadarias que permitem a passagem através da barreira (Fig. 92). As linhas tendem a ser suaves, fluídas e livres, tornado-a tudo menos monótona.

Um outro caso, muito utilizado como um bom exemplo da inovação arquitectónica em barreiras de protecção contra o ruído, é o denominado de *Sound Tube* em Melbourne, Austrália (Fig. 93).



Fig. 93 – Sound Tube em Melbourne Austrália (Rugless, R., 1999)

Este “tubo de som” consiste numa estrutura curva ao longo de 30 metros, sobre um viaduto, em que um dos lados é preenchido por painéis de forma a garantir a protecção contra o ruído de uma zona de torres habitacionais. Acima do seu papel como barreira sonora, o *Sound Tube* é uma obra arquitectónica que surge a quem se desloca do centro de Melbourne para o aeroporto da cidade, como a entrada ao famoso Gateway, uma espécie de escultura em movimento moderna.

A Austrália, com a sua extensa e moderna rede rodoviária, é de facto um dos locais onde se assiste a um maior desenvolvimento em termos de barreiras sonoras, principalmente quando se fala do aspecto

arquitectónico. A prova disso é o *Craigieburn Bypass* que se localiza perto da que foi anteriormente descrita, a norte em Melbourne.



Fig. 94 - Craigieburn Bypass a Norte de Melbourne (Schaik, L., 2004)

Esta obra de arte torna-se muito interessante tendo em conta que consiste numa passagem desnivelada pedonal sobre uma rodovia, que se insere numa ideia de continuidade com a barreira sonora, que percorre o primeiro trecho da via. Esta barreira de protecção contra o ruído, constituída por painéis metálicos, é caracterizada por linhas curvas e formas livres criando o efeito de onda que se propaga ao longo dela.

Num segundo trecho surge outro tipo de barreira sonora, constituída por painéis de acrílico semi-transparentes, e caracterizada por vários tipos de efeitos, nomeadamente criados por sistemas luminosos de alta tecnologia que á noite dão vida à barreira.

Este trecho de via foi considerado, segundo a *Open the Window*, como “um modelo de 17 Km do design de infra-estrutura que é ambientalmente sensível, socialmente consciente, esteticamente atraente e pragmaticamente efectivo”. Afirma-se até que para a sua construção, até a população nativa que habita as redondezas foi ouvida em relação às suas preocupações e opiniões. (Schaik, L., 2004)

4.7.2. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Uma surpreendente e inovadora ideia, que tem vindo a ser cada vez mais discutida e estudada, é a aplicação de painéis fotovoltaicos ao longo das vias de comunicação funcionando como barreiras de protecção contra o ruído (Fig. 95).

A utilização de painéis fotovoltaicos traduz-se normalmente em barreiras sonoras do tipo reflectoras. No entanto, é possível a aplicação de algum tipo de fibra com capacidade de absorção acústica em simultâneo com o painel, conferindo á barreira capacidades de absorção.



Fig. 95 – Utilização de Painéis Fotovoltaicos em Barreiras Sonoras (Rocha, J., 2006)

A aplicação de painéis fotovoltaicos pode ser feita em barreiras sonoras já existentes, servindo estas ao seu suporte, ou integradas em projectos de novas barreiras. Neste último caso poderá proceder-se à pré-fabricação dos painéis e subestruturas, traduzindo-se em grandes ganhos económicos. Os painéis poderão ser aplicados directamente no terreno, formando a totalidade da barreira, ou aplicados sobre muros de betão armado. Este último caso é geralmente o mais utilizado, pois permite a protecção dos painéis dos agressores viários.

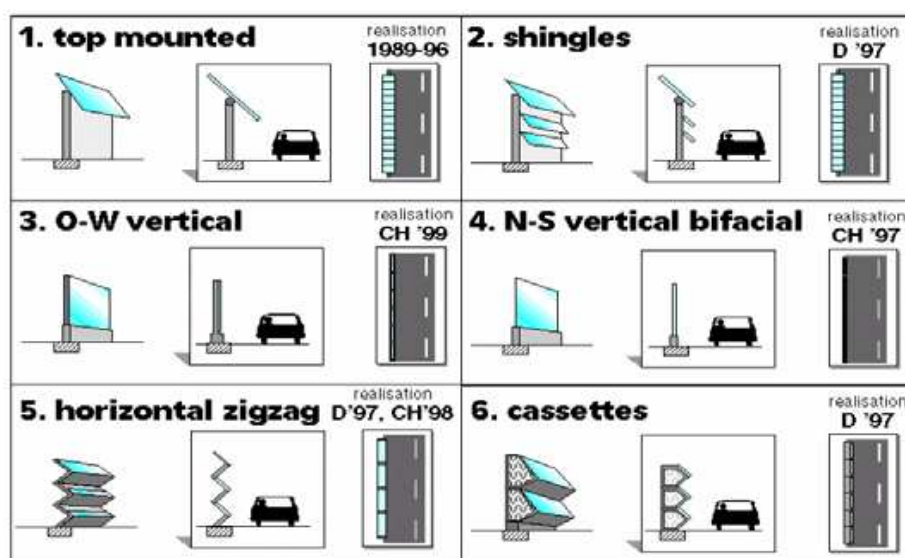


Fig. 96 – Diferentes Configurações de Barreiras Sonoras aplicando Painéis Fotovoltaicos (Nordmann,T. Et al)

Este tipo de solução torna-se, em termos ambientais, duplamente interessante, aliando a protecção contra o ruído viário à produção de energias renováveis, contribuindo dessa forma para a diminuição das emissões de CO₂. Esta junção de barreiras sonoras com centrais solares de produção energética traduz-se também em significativos ganhos económicos, aliando os custos de duas infra-estruturas distintas numa.

A crescente preocupação com o ambiente, em particular com o aquecimento global resultante das emissões excessivas de CO₂ são responsáveis por um grande aumento da utilização de painéis fotovoltaicos na produção de energia, que se tem traduz num cada vez maior desenvolvimento desta tecnologia. O resultado tem vindo a ser painéis mais eficientes e económicos. Este conjunto de factos torna cada vez mais interessante a aplicação deste tipo de painéis em barreiras de protecção contra o ruído.

Outras vantagens são apontadas a este tipo de barreira, nomeadamente a duplo uso de recursos territoriais, o impacto positivo no público, nomeadamente o sentimento de orgulho da produção de energias limpas e compromisso com a protecção do ambiente, e a importância que assume na mitigação de duas das maiores problemáticas dos centros urbanos modernos: o ruído, e a produção de energia. (Rocha, J., 2006)

No caso das vias ferroviárias, a utilização de barreiras fotovoltaicas poderá ser utilizada como fonte auxiliar de alimentação eléctrica da própria via, ou dos elementos secundários que a compõem, nomeadamente sinalização e iluminação.

Os painéis fotovoltaicos devem direccionarem-se de forma a ser potencializada a exposição solar a que serão sujeitos, no entanto, quando aplicados a barreiras sonoras, terão que percorrer as curvaturas seguidas pela via em questão. No entanto, este facto poderá implicar o não correcto aproveitamento dos painéis, deixando de ser interessante a sua aplicação. Assim, dever-se-á proceder à instalação de barreiras que utilizem estes painéis, apenas nos trechos da via perpendiculares à linha da direcção de exposição solar máxima, ou com pequenos desvios dos mesmos.

Os painéis fotovoltaicos são naturalmente mais dispendiosos que qualquer outro tipo de painel utilizado em barreiras sonoras. Assim, apesar dos ganhos inerentes à produção de energia eléctrica, poderão também significar elevados custos de manutenção. Imagine-se os custos que implicaria ter que se trocar frequentemente de painéis fotovoltaicos devido a choques em barreiras numa zona da via propícia a despistes. Aconselha-se então, aquando da utilização deste tipo de painel, a instalação dos devidos mecanismos de protecção

4.7.3. BARREIRAS AQUÁRIO

O sugestivo nome de barreiras aquário até ao momento não passa de uma mera ideia teórica, no entanto tem vindo a ser estudadas as possibilidades de isolamento acústico proporcionado pela água, pelo que poderá ser no futuro uma realidade.

Um estudo realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto comprova de facto que, apesar do líquido permitir maiores velocidades de propagação do som, e que, portanto, poder ser visto como um meio de maior transmissibilidade sonora, a sua utilização como barreira sonora traduz-se de facto em isolamentos relativamente bons. Poderá parecer contraditório, mas tal deve-se ao momento em que as ondas sonoras têm de proceder à passagem do meio gasoso ao meio líquido, o qual, como foi provado, implica uma perda relativa da energia acústica. (Coutinho, A., 2008)

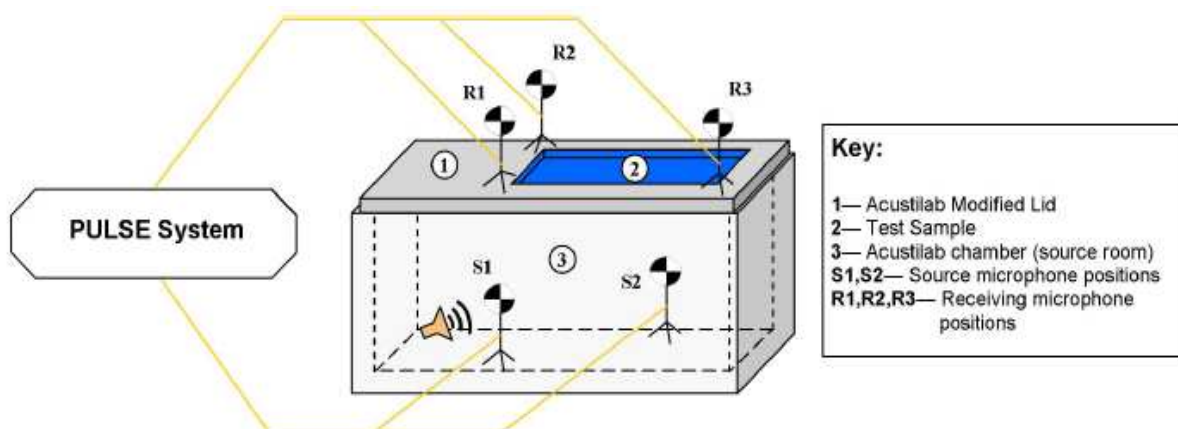


Fig. 97 - Modelo de Estudo do Isolamento Sonoro dos Líquidos (Coutinho, A., 2008)

Os resultados obtidos são realmente surpreendentes e verifica-se, de facto, pela análise da Fig. 98 que a utilização de uma superfície líquida permite obter reduções sonoras significativas.

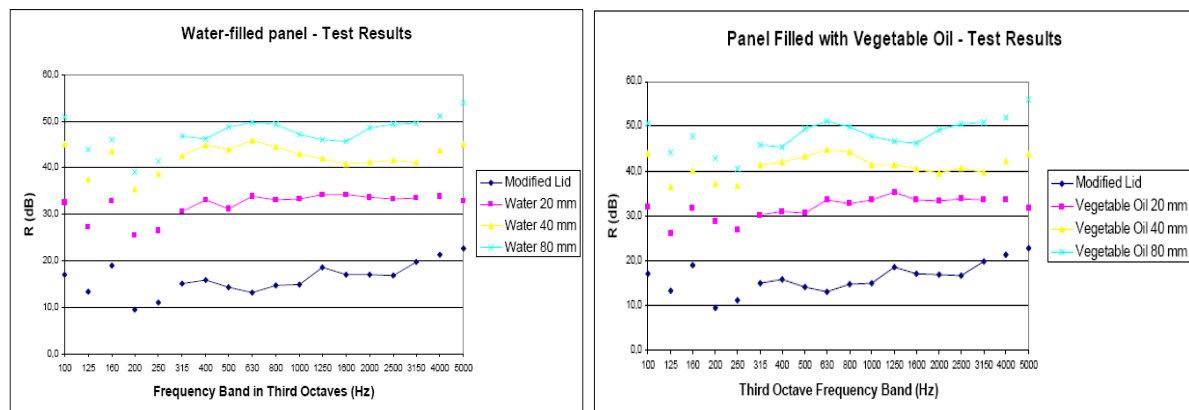


Fig. 98 - Redução Sonora obtida com Painéis de Água (à esquerda) e Óleo Vegetal (à direita) (Coutinho, A., 2008)

Verifica-se que diferentes líquidos apresentam comportamentos semelhantes, sendo que para espessuras de 20 mm de líquido consegue-se obter reduções sonoras acima dos 30 dB. Quando se aumenta a espessura para o dobro, a redução sonora encontra-se entre os 40 e os 45 dB. Nos 80 mm de espessura, esta rondará os 50 dB. (Coutinho, A., 2008)

Estes relevantes resultados abrem as portas da criatividade na aplicação de tal tipo de tecnologias, e o mundo de isolamento acústico ganha toda uma nova visão. Imagine-se, por exemplo, a aplicação dos reservatórios da água para fins domésticos, localizada no meio das próprias paredes de forma a que ao mesmo tempo garanta a protecção da mesma contra o ruído. Tendo por base estes resultados, pode-se até pensar na aplicação de “paredes aquários”, com bons comportamentos acústicos, abrindo novas vertentes à arquitectura dos edifícios.

As barreiras sonoras em vias de comunicação poderão ser outro tipo de aplicação possível de painéis preenchidos a líquidos. Põe-se a hipótese de as barreiras formarem uma espécie de depósito que recolha as águas da chuva e as armazena com o objectivo de as utilizar como isolamento contra o ruído. Existe ainda a possibilidade de utilização dos já banalizados painéis transparentes em simultâneo com estes reservatórios, permitindo a transformação da barreira em verdadeiros aquários ao longo de auto-estradas ou linhas de ferro, com vantagens evidentes no problemático impacto visual característico das barreiras acústicas.

Não existem ainda aplicações práticas desta tecnologia, pelo que não passa de uma mera ideia, mas que pelos excelentes resultados obtidos pela mesma, não deverá ser posta de parte a hipótese de se tornar no futuro das barreiras sonoras.

4.7.4. NOVOS MATERIAIS E FORMAS

As barreiras sonoras, tendo em consideração o objectivo a que se propõem, deverão proporcionar a maior capacidade de isolamento acústico possível. Esse isolamento está muito relacionado com os materiais utilizados e com as formas que tomam esses materiais. Assim, esta será das áreas onde se tem investido mais em investigação e desenvolvimento de novas soluções em barreiras sonoras. Existem já vários tipos de interessantes utilizações de materiais em painéis de barreiras sonoras, como são os casos já falados de borracha reciclada, plásticos e betão reciclado.

Outros tipos de aplicação de materiais mais arrojados têm sido desenvolvidos. É o caso, por exemplo, da solução proposta pela empresa Kokosystems, que declara vantagens acústicas (coeficientes de absorção sonora, α_s , acima dos 1 para baixas frequências na ordem dos 500 Hz, segundo as suas especificações técnicas) e estéticas com a aplicação de fibras de casca de coco em painéis de barreiras sonoras (Fig. 99).



Fig. 99 - Painéis Kokosystems

Outra empresa, que aposta na inovação das barreiras sonoras é a holandesa Van Campen Aluminium, que conseguiu transformar o alumínio, num material adequado à protecção contra a propagação do ruído em vias de comunicação, através de inovadores designs (Fig. 100).

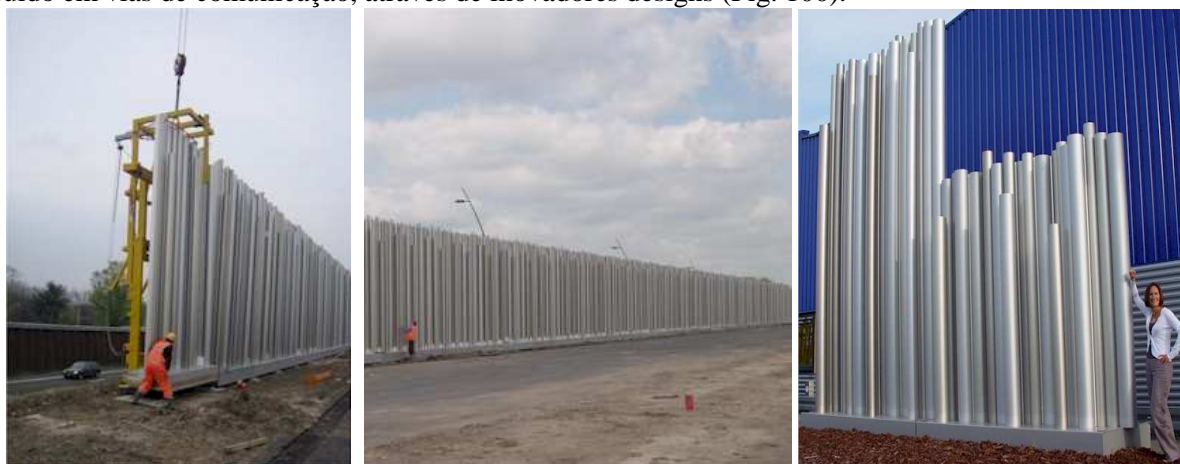


Fig. 100 - Pipe Barrier da Van Campen Aluminium

Ao que se consta, o design terá sido inspirado numa escultura de Eusebio Sempere, que diziam ter a característica de conseguir bloquear a propagação do ruído. (Campen, 2009)

O resultado final é de facto satisfatório, sendo que estes tubos de alumínio que lembram tubos de órgão, que são perfurados e preenchidos por algum tipo de fibra com capacidade de absorção acústica, conseguem obter reduções sonoras na ordem dos 30 dB. (Campen, 2009)

4.7.5. CURVATURAS E TOPOS DA BARREIRA

O desempenho acústico das barreiras não depende, no entanto, apenas dos materiais aplicados e das formas da superfície. De facto, com o aperfeiçoar do conhecimento acerca do comportamento dos campos acústicos, chegou-se à conclusão que pequenas alterações nas configurações das barreiras se poderiam traduzir em ganhos acústicos significativos.

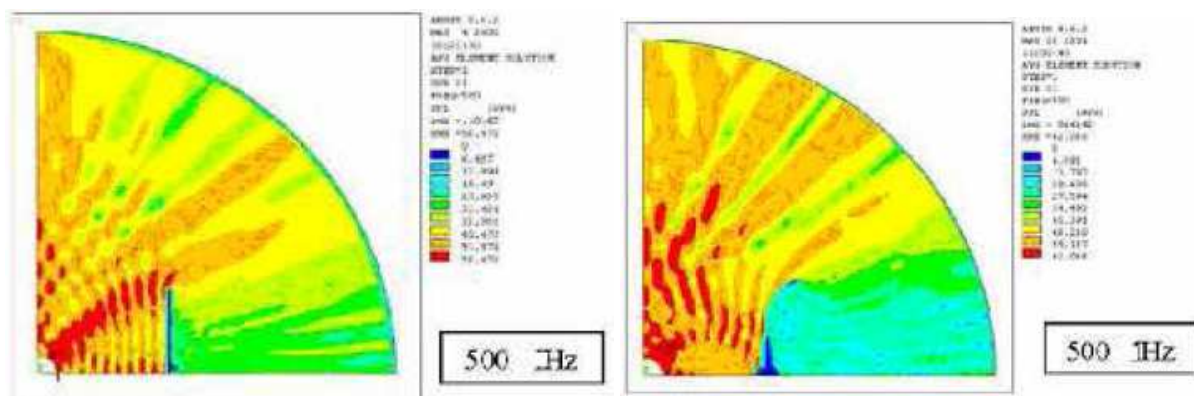


Fig. 101 - Influência no campo acústico por barreiras curvas (Brunbauer, W., 2006)

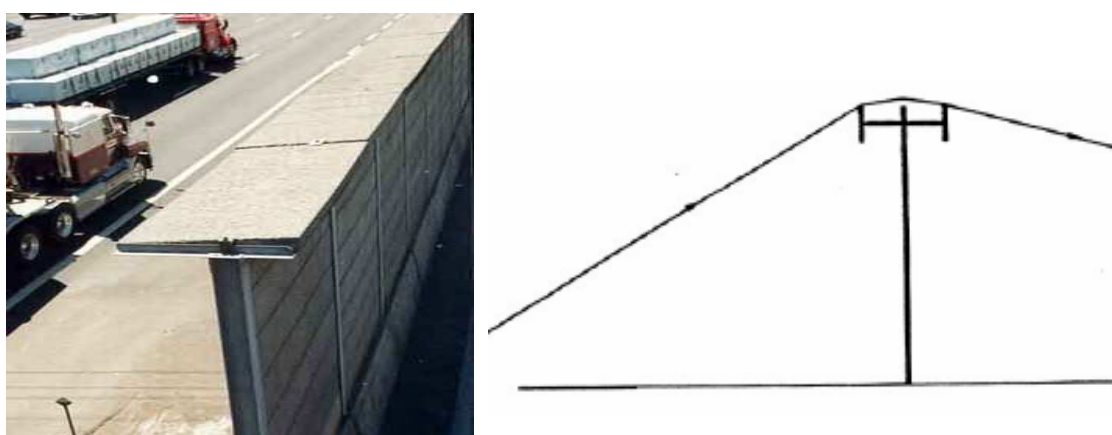


Fig. 102 - Utilização de Perfis em T no Topo das Barreiras Sonoras

Estas pequenas alterações na configuração das barreiras sonoras provocam o aumento do percurso das ondas difractadas e diminuem o ângulo de inserção das mesmas. Este fenómeno na prática traduz-se na criação de uma maior zona de sombra, e é responsável por uma maior perda de energia acústica no percurso até ao receptor, melhorando, portanto o isolamento criado pela barreira.

A utilização destes simples mecanismos pode-se traduzir na diminuição significativa da altura da barreira, que em longos percursos se traduz em ganhos económicos significativos. Assim o investimento no estudo da influência dos mesmos para a sua aplicação em futuras barreiras, não é de todo perdido.

4.8. DISCUSSÃO DAS SOLUÇÕES

Ao longo do capítulo foram expostas as várias soluções que têm vindo a ser aplicadas na construção de barreiras sonoras, e elas são muitas. A decisão da escolha entre elas passa pela análise individual de todo o contexto por detrás da sua construção, sendo que cada solução é caracterizada por determinado grupo de vantagens, que se tornam mais ou menos relevantes em conformidade com a obra em questão.

Para zonas mais sensíveis, como é o caso dos parques, zonas protegidas, zonas históricas, a barreira a implementar terá de valorizar o aspecto estético de forma a mitigar ao máximo o impacto visual

causado pela sua construção. É natural neste caso que exista preferência, por exemplo, na utilização de painéis transparentes, painéis de madeira, ou painéis com superfícies sujeitas a tratamentos artísticos. O prolongamento das barreiras nestas zonas não costuma ser elevado, pelo que se justifica o maior investimento a nível arquitectónico de forma a que se chegue a soluções esteticamente mais interessantes.

No caso da aplicação de barreiras sonoras ser feita sobre estruturas já existentes, é naturalmente vantajoso a utilização de painéis cuja instalação não implique acréscimos significativos de cargas. Assim, o peso específico dos painéis tornar-se um factor preponderante na escolha da solução, sendo que as utilizações de painéis de betão leve, de caixões metálicos ou plásticos e de acrílico tornam-se as melhores soluções.

Em certos casos a necessidade de instalação de barreiras prolonga-se em trechos contínuos de vários quilómetros. Quando tal acontece torna-se inviável a aplicação de soluções demasiadamente complexas e dispendiosas, pelo que o aspecto estético perde importância. Neste caso os painéis de betão pré-fabricado, e os painéis de caixão metálicos serão boas opções devido à simplicidade e aos baixos custos de fabricação e instalação.

Os painéis de betão armado serão também os mais adequados em casos de exposição a agressores violentos e cargas representativas, como consequência das elevadas resistências que o betão lhes confere.

Devido à sua simplicidade de fabricação e instalação, o betão armado, em conjunto com os painéis metálicos, são de facto dos materiais mais utilizados em barreiras sonoras.

De facto, os painéis de betão armado servem de base à grande maioria das soluções, criando a resistência necessária para a aplicação das várias soluções de revestimento ou de qualquer outro tipo de mecanismo de absorção sonora.

O betão armado é também um material que permite uma bem melhor previsão do comportamento estrutural dos painéis do que no caso de qualquer outra solução, nomeadamente as metálicas. Este é um aspecto preponderante no caso de situações onde são aplicadas cargas significativas, onde a previsão do comportamento dos painéis poderá precaver situações de rotura que se traduzam em elevados gastos em futuras reparações.

Considerando que o âmbito deste trabalho insere-se em particular nas vias ferroviárias de alta velocidade, que devido às suas características únicas se tornam especialmente exigentes em relação ao comportamento estrutural dos seus componentes e, por outro lado, nunca se desenvolverá por distâncias curtas, parece realmente vantajoso a utilização de betão armado nas barreiras sonoras instaladas ao longo do seu desenvolvimento.

5

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA
BARREIRA SONORA EM AV****5.1. INTRODUÇÃO**

O aumento da velocidade em vias ferroviárias traduz-se também num aumento das exigências estruturais dos vários elementos que as constituem, como consequência, nomeadamente, do aumento de cargas impostas e, acima de tudo, dos efeitos dinâmicos resultantes das grandes velocidades. Com o desenvolvimento e expansão da alta velocidade, a preocupação com essas mesmas exigências deve ser crescente, pelo que novos estudos na área tornam-se indispensáveis.

As barreiras sonoras não são excepção aos elementos que enfrentam estas novas exigências, pelo que, as barreiras geralmente utilizadas em banais ferrovias poderão não ter comportamentos aceitáveis em alta velocidade. De facto, o aumento da velocidade provoca a criação de pressões aerodinâmicas significativas à passagem dos comboios AV. Estas cargas móveis induzem um comportamento dinâmico nas estruturas de proximidade, como poderá ser o caso de barreiras sonoras. Tendo por base esse conceito, durante o desenvolvimento deste capítulo procurar-se-á proceder ao aprofundamento da análise estrutural de uma barreira sonora considerando as novas exigências expostas nas recentes actualizações dos Eurocódigos em relação à alta velocidade.

Para tal, numa primeira fase tentar-se-á proceder a um esclarecimento das normas impostas pelos Eurocódigos acerca da alta velocidade e, em particular, a tudo o que se enquadre no dimensionamento de barreiras sonoras. Pretende-se também a utilização de exemplos históricos para se perceber as consequências práticas da não correcta utilização das mesmas normas. Numa segunda fase, proceder-se-á ao estudo das novas necessidades estruturais das barreiras em alta velocidade, através de dimensionamentos paramétricos, para determinado tipo de barreira sonora, tendo por base os esclarecimentos das normas europeias.

No final do actual capítulo pretende-se o esclarecimento acerca da conformidade dos actuais conceitos de dimensionamento de barreiras sonoras utilizados em ferrovias tradicionais, aplicados em alta velocidade e, no caso dessa mesma conformidade não ser verificada, pretende-se a indicação de novos procedimentos que tornem os dimensionamentos satisfatórios.

5.2. O EXEMPLO DA LINHA COLOGNE-FRANKFURT

Um dos primeiros casos de estudo acerca das consequências das cargas dinâmicas em barreiras sonoras criadas pelas pressões aerodinâmicas da alta velocidade ocorreu na linha entre Cologne e Frankfurt, Alemanha.

De facto, alguns meses depois da primeira linha alemã de alta velocidade com serviços regulares de 300 Km/h (Cologne-Frankfurt) ter, em 2002, sido oficialmente posta em serviço, verificou-se a existência de vários danos nos painéis de absorção sonora, feitos de alumínio (Fig. 103). As barreiras sonoras constituídas por painéis empilhados, instaladas durante a execução do projecto em 2001, foram dimensionadas tendo em consideração os códigos válidos na altura, que, de facto, se revelaram de todo inadequados.



Fig. 103 – Exemplos dos danos das barreiras verificados na linha Cologne – Frankfurt (B. Hoffmeister, 2007)

As primeiras inspecções aos danos concluíram que esses eram aparentemente causados por uma combinação dos efeitos dinâmicos e de cargas de fadiga. De facto, verificou-se que os vários elementos de ligação dos painéis aos postes não eram dimensionados de forma apropriada para transferir as cargas a que seriam sujeitos.

Outras inspecções mais cuidadas que se seguiram indicavam que as acções aerodinâmicas foram responsáveis por um comportamento dinâmico muito desfavorável na totalidade do sistema estrutural. A passagem do comboio provocaria a vibração dos postes transmitindo esforços flexionais e torcionais aos elementos. Conclui-se ainda que devido à frequência de passagem de comboios seria claro que os efeitos de fadiga deveriam ter sido tidos em conta no dimensionamento.

No relatório final identificaram-se vários factores responsáveis pelo fraco desempenho estrutural das barreiras de protecção contra o ruído implementadas ao longo da linha. Entre elas enumera-se os seguintes pontos: (B. Hoffmeister, 2007)

- o modelo de cargas fornecido pelos códigos da altura não representaram correctamente as acções aerodinâmicas reais;
- as formulações presentes nos códigos estavam parcialmente incorrectas;
- os procedimentos dos testes não foram os adequados;
- o dimensionamento e os métodos de cálculos não foram os correctos, nomeadamente os cálculos estáticos e as verificações de fadiga;
- os detalhes dos painéis seriam pobres.

Além de todos estes factores, as entidades investigadoras indicaram como principal razão para os danos a falta do estudo da resposta dinâmica da totalidade do sistema estrutural da barreira de protecção contra o ruído.



Fig. 104 – Testes de medição realizados nas barreiras sonoras (B. Hoffmeister, 2007)

Novos estudos foram realizados, nomeadamente através da medição das pressões aerodinâmicas e das consequências da existência de efeitos dinâmicos significativos e de fadiga causados por estes, de forma a serem desenvolvidos novas regulamentações que evitassem o sucedido.

5.3. FUNDAMENTOS REGULAMENTARES

O dimensionamento de uma barreira sonora passa em primeiro lugar pela análise das cargas a que será sujeita na sua vida útil. Em primeira análise as tradicionais barreiras sonoras, utilizadas em vias rodoviárias, normalmente auto-estradas, e em ferrovias, estão sujeitas apenas às cargas verticais que resultam do peso próprio e às cargas horizontais que surgem como consequência da acção do vento sobre os painéis.

As indicações em relação às características das acções em estruturas em geral deverão ser encontradas nos Eurocódigos 0 e 1, estabelecendo o primeiro as bases para o projecto de estruturas e o segundo indicações mais específicas acerca das acções nessas mesmas estruturas.

5.3.1. PESO PRÓPRIO

As especificações em relação ao peso próprio podem ser encontradas no Eurocódigo 1, parte 1-1 – Acções Gerais, nomeadamente nos pontos 4 e 5, que remetem os valores característicos dos pesos volúmicos dos vários materiais para o Anexo A. No caso da utilização de materiais novos, a determinação dos valores característicos dos pesos próprios deverá ser efectuada em conformidade com o ponto 4.1.2 do Eurocódigo 0.

5.3.2. ACÇÃO DO VENTO

5.3.2.1. Eurocódigo

As acções do vento são objecto da recente parte 1-4 do Eurocódigo 1 (Wind Actions, 2005), que expõe os procedimentos a adoptar no cálculo das pressões do vento em diversos tipos de superfície.

De uma forma muito geral, a pressão do vento em superfícies externas deverá ser calculada pela expressão (7), segundo o 5.2 do EN 1991-1-4.

$$We = q_b(z_e).c_{pe} \quad (7)$$

Onde:

- $q_b(z_e)$ é a pressão para a velocidade de pico;
- z_e é a altura de referência para a pressão externa;
- c_{pe} é o coeficiente de pressão para a pressão externa.

Torna-se necessário então proceder ao cálculo da pressão para a velocidade de pico, $q_b(z_e)$, e do coeficiente de pressão c_p .

A pressão para a velocidade de pico, q_b , é dada pela expressão (8), que poderá ser encontrada 5.2 do EN 1991-1-4.

$$q_b(z) = c_e(z).q_b \quad (8)$$

Onde $c_e(z)$, representa o factor de exposição, que tem a ver com a rugosidade do terreno (quadro 5) e factores de turbulência, podendo ser obtido segundo o gráfico da Fig. 105.

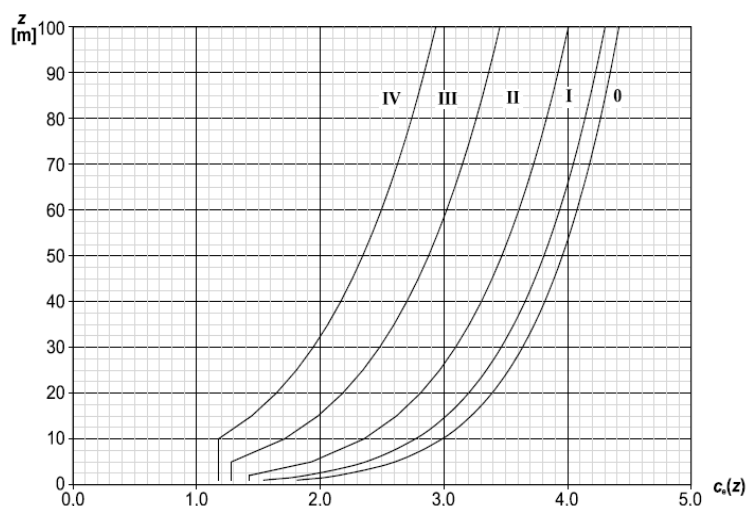


Fig. 105 – Factor $c_e(z)$ com a altura para diferentes zonas de rugosidade (EN 1991-1-4, 2005)

Quadro 5 - Categorias do terreno em termos de rugosidade (EN 1991-1-4, 2005)

Categoria do terreno	Descrição
0	Mar ou área costeira exposta a mar aberto
I	Lagos ou áreas rasas e horizontais com vegetação negligenciável e sem obstáculos
II	Áreas com baixa vegetação como relva e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separação de pelo menos 20 vezes a altura do obstáculo
III	Área com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios ou com obstáculos isolados com uma separação máxima de 20 vezes a altura do obstáculo (como vilas, terreno suburbano, florestas permanentes)
IV	Área em qual pelo menos 15% da superfície é coberta com edifícios e a sua média de alturas exceda os 15 m

Por sua vez, q_b é calculado pela expressão (9), cujo valor v_b , velocidade básica do vento, e ρ , a densidade do ar, serão definidos no Anexo Nacional de cada estado.

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (9)$$

Por fim, o valor c_{pe} é obtido em conformidade com o apresentado 7.2 do EN 1991-1-4, em que os valores de $c_{pe,1}$ e $c_{pe,10}$ serão determinados pela análise da Fig. 106 e do Quadro 4.

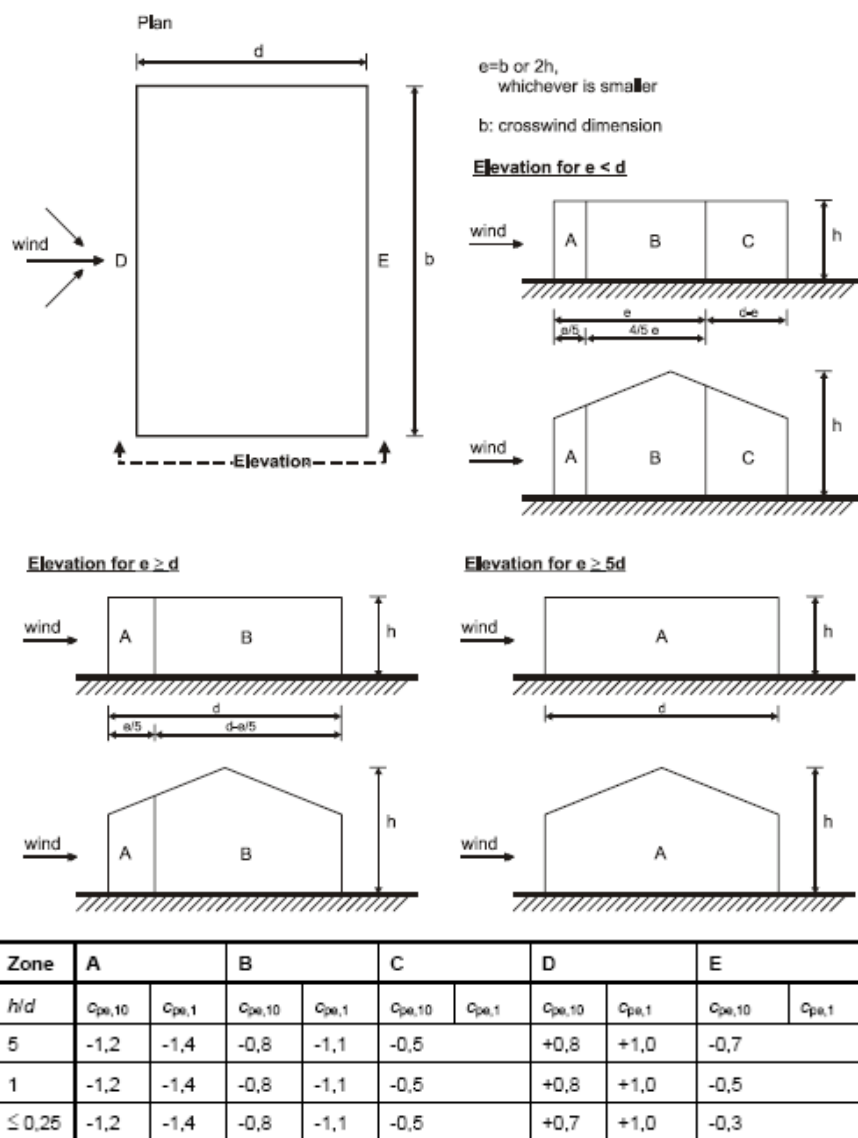


Fig. 106 – Análise dos valores $c_{pe,10}$ e $c_{pe,1}$ (EN 1991-1-4, 2005)

No entanto, actualmente, em Portugal, os Anexos Nacionais em relação a estas normas estão ainda em fase de elaboração, pelo que correntemente recorre-se ao RSA – Regulamento de Segurança a Acção para Estruturas de Edifícios e Pontes. Assim, no desenvolvimento deste trabalho, pretendendo-se por um lado o esclarecimento das actuais normas europeias, mas por falta de dados adequados à situação nacional, será utilizada este mesmo RSA para a determinação das acções do vento sobre as barreiras sonoras.


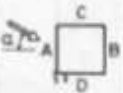
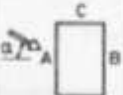
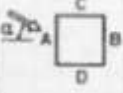

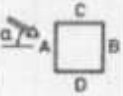
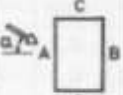
5.3.2.2. RSA

O cálculo das acções do vento através do RSA são relativamente mais simples que no caso da utilização do Eurocódigo. Neste caso, a pressão do vento será calculado pela simples aplicação da expressão (10).

$$p = \delta_p \cdot w_k \quad (10)$$

Em que δ_p corresponde ao coeficiente de pressão, obtido pela análise do quadro 6, e w_k à pressão dinâmica do vento, obtida pela análise da Fig. 107.

Quadro 6 – Coeficiente de Pressão para Paredes (RSA, 2009)

Coeficientes de pressão δ_{pe} para paredes								
Relações geométricas do edifício (*)		Planta	Direcção do vento α (graus)	Accões globais sobre as superfícies				Accões locais na faixa referenciada na figura 
$\frac{h}{b}$	$\frac{a}{b}$			A	B	C	D	
$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+0,7	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8
			90	-0,5	-0,5	+0,7	-0,2	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0	+0,7	-0,25	-0,6	-0,6	-1,0
			90	-0,5	-0,5	+0,7	-0,1	
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+0,7	-0,25	-0,6	-0,6	-1,1
			90	-0,6	-0,6	+0,7	-0,25	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0	+0,7	-0,3	-0,7	-0,7	-1,1
			90	-0,5	-0,5	+0,7	-0,1	
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0	+0,8	-0,25	-0,8	-0,8	-1,2
			90	-0,8	-0,8	+0,8	-0,25	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0	+0,7	-0,4	-0,7	-0,7	-1,2
			90	-0,5	-0,5	+0,8	-0,1	

(*) h representa a altura do edifício; a e b representam, respectivamente, a maior e a menor dimensão em planta

Verifica-se a existência de coeficientes diversos para acções globais e locais. Estas últimas correspondem às estruturas que se localizem nas extremidades das paredes, e têm um valor maior como resultado dos fenómenos de turbulências que se verificam nessas zonas.

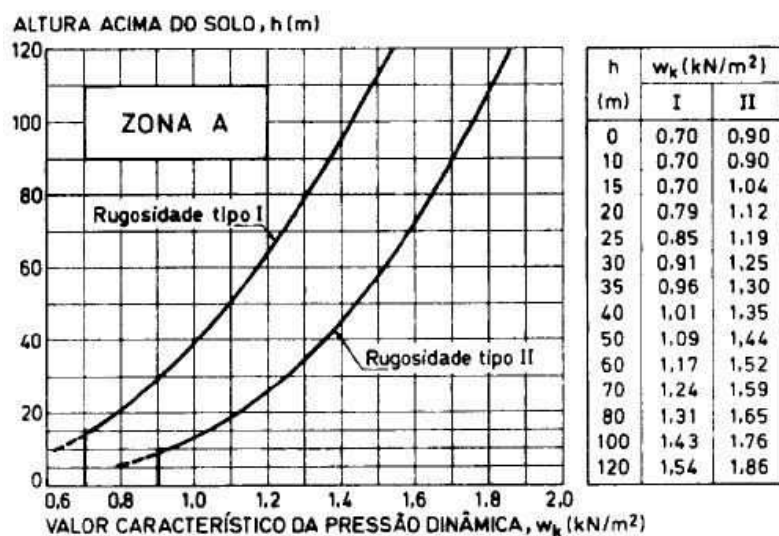


Fig. 107 – Valor Característico da Pressão Dinâmica do Vento para a Zona A (RSA, 2009)

Antes do cálculo das pressões do vento é necessário determinar o tipo de zona onde será aplicada a estrutura bem como a rugosidade do terreno circundante.

Existem fundamentalmente duas zonas: zona A e zona B. A primeira corresponde à generalidade do terreno, enquanto a segunda ao território localizado em ilha, faixa costeira de 5 Km e altitudes superiores a 600 metros. A zona B pretende então representar as zonas mais ventosas, onde estas estruturas serão sujeitas a maiores pressões. Para a determinação das pressões dinâmicas do vento na zona B, o RSA indica que bastará a multiplicação por 1,2 dos valores da zona A (Fig. 107).

Em relação à rugosidade do terreno, pode ser igualmente dividida em dois tipos: tipo I e tipo II. A distinção entre os diferentes tipos é dada por definições muito gerais fazendo corresponder o tipo I às zonas urbanas, e o tipo II às rurais.

5.3.3. PRESSÃO AERODINÂMICA

Esta é de facto a carga adicional que se deve ter em conta na análise de estruturas que se encontrem em proximidade às linhas de alta velocidade ferroviária, que não é considerada no dimensionamento dessas mesmas estruturas em vias tradicionais.

É possível encontrar já na parte 2 do Eurocódigo 1, referente às cargas de tráfico sobre pontes, e em especial na secção 6 (Rail Traffic Actions and Other Actions Specifically for Railway Bridges) indicações sobre as cargas aerodinâmicas a serem consideradas no dimensionamento de barreiras sonoras próximas a vias ferroviárias de alta velocidade.

De facto o ponto 6.6 descreve as características das cargas aerodinâmicas resultantes da passagem do comboio. Essas cargas, segundo o Eurocódigo, sujeitam qualquer estrutura situada perto da linha a uma onda móvel, alternando entre pressão e sucção, pelo que estes fenómenos deverão ser tidos em conta no seu dimensionamento. A magnitude da acção dependerá principalmente dos seguintes factores:

- o quadrado da velocidade do comboio;
- a forma aerodinâmica do comboio;

- a forma da estrutura;
- a posição da estrutura, em particular a inexistência de obstáculos entre o veículo e a estrutura.

O Eurocódigo apresenta então o modelo que deverá ser considerado no dimensionamento de estruturas perto dessas vias, que se baseia em cargas equivalentes aplicadas na dianteira e na traseira dos comboios. Os valores característicos dessas cargas estão representados na Fig. 108.

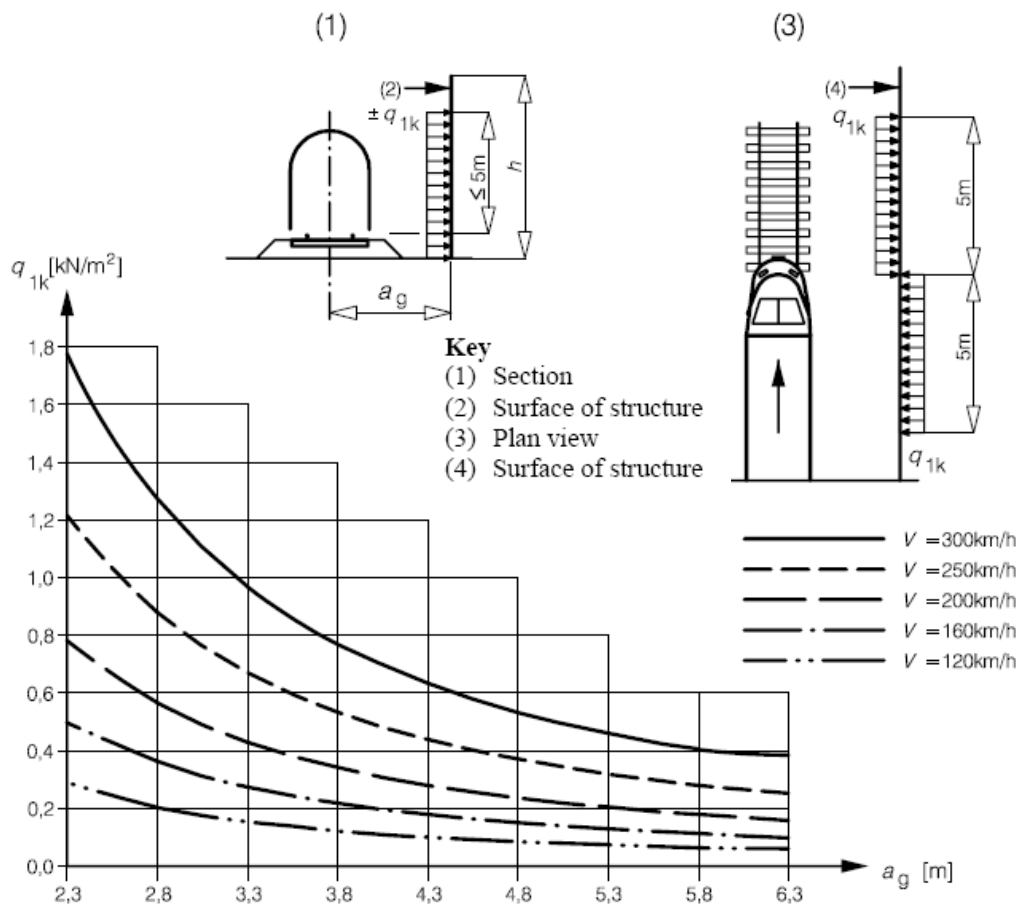


Fig. 108 – Valores característicos das acções q_{1k} para superfícies verticais simples paralelas à via

A velocidade considerada no processo de análise da carga característica deve ser a velocidade máxima de serviço.

O Eurocódigo tem ainda em consideração os esforços adicionais impostos às estruturas de extremidade como resultado da interrupção repentina da onda criada na estrutura. Assim, aconselha à utilização de um factor de amplificação dinâmica de valor 2, que deve ser multiplicado pela carga equivalente, numa distância de 5 metros do início e do final da estrutura.

As cargas equivalentes poderão ser multiplicadas por um factor k_1 tendo em consideração a aerodinâmica dos comboios das linhas em questão. O valor de k_1 aconselhado é de 0,85 para comboios com boas performances aerodinâmicas e 0,6 para comboios com muito boas performances aerodinâmicas (ETR, ICE, TGV, Eurostar ou semelhante).

Por outro lado, as cargas equivalentes deverão ser aumentadas de um factor k_2 de valor 1,3, no caso de elementos da barreira caracterizadas por alturas menores que 1 metro e comprimentos menores que 2,50 metros.

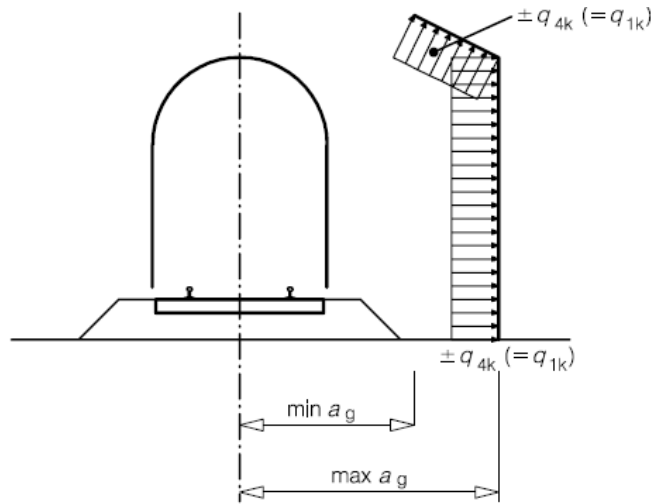


Fig. 109 – Estrutura com Superfície Vertical e Horizontal

O Eurocódigo põe também a hipótese da existência de estruturas com superfícies verticais e inclinadas em simultâneo. Nesse caso as cargas devem ser tiradas de igual forma do gráfico da Fig. 108, admitindo, no entanto, uma distância ponderada da estrutura ao eixo da ferrovia, a'_g , calculada pela expressão (11). Os valores de $\min a_g$ e $\max a_g$ estão representados na Fig. 109.

$$a'_g = 0,6 \min a_g + 0,4 \max a_g \quad (11)$$

O valor limite de $\max a_g$ deverá ser 6 metros, pelo que no caso deste limite ser ultrapassado deverá ser adoptado este valor.

5.3.4. COMBINAÇÃO DE ACÇÕES

Conhecendo as cargas que deverão actuar sobre as barreiras sonoras, deve-se proceder ao estudo das combinações mais desfavoráveis entre elas de forma a que se proceda correctamente ao dimensionamento com o objectivo, segundo o Eurocódigo 0, de serem cumpridos os limites últimos e de serviço.

Para a análise do estado limite último deve ser garantida a combinação fundamental, que assume a forma da equação (12).

$$Ed = \gamma_{sd} E \left\{ \gamma_{G,j} G_{k,j}; \lambda_P P; \gamma_{q,1} Q_{k,1}; \gamma_{q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad j>1; i>1 \quad (12)$$

Por sua vez, para a análise dos estados limites últimos de utilização, deverão ser tidas em conta as seguintes combinações: combinação característica (13), combinação frequente (14) e combinação quase-permanente (15).

$$Ed = E \left\{ G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad j>1; i>1 \quad (13)$$

$$Ed = E \left\{ G_{k,j}; P; \psi_{1,i} Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\} \quad j>1; i>1 \quad (14)$$

$$Ed = E \left\{ G_{k,j}; P; \psi_{2,i} Q_{k,1} \right\} \quad j > 1; i > 1 \quad (15)$$

Segundo, então, o A1.2(B) da EN 1990, os coeficientes de majoração para cargas permanentes, γ_{Gj} , devem tomar o valor de 1,35, quando são desfavoráveis, e 1,00, quando tomam o papel de favoráveis. Por sua vez, no caso de acções variáveis, γ_{Q1} e γ_{Qi} , tomam ambos valores de 1,5 ou 0, no caso de serem respectivamente desfavoráveis ou favoráveis.

Os coeficientes ψ aplicados às cargas variáveis variam em conformidade com a natureza dessas mesmas cargas. Os valores aconselháveis para tais coeficientes deverão ser encontrados nos anexos do Eurocódigo 0.

5.4. PRESUPOSTOS E SIMPLIFICAÇÕES DE CÁLCULO

Compreendendo as normas em relação às características das cargas aplicadas nas barreiras sonoras, pode-se, então, fazer as primeiras abordagens à sua análise estrutural. Pretende-se proceder ao dimensionamento de uma barreira de protecção contra o ruído de forma a que faça frente a estas novas considerações, essenciais em alta velocidade.

Em primeiro lugar, será necessário proceder à escolha do tipo de barreira que servirá de caso de estudo, nomeadamente em relação aos materiais e ao modelo estrutural. Em seguida, tentar-se-á analisar o impacto na alteração dos vários parâmetros no dimensionamento desse tipo de barreira.

De forma a se poder realizar um estudo paramétrico da influência das cargas aerodinâmicas no dimensionamento das estruturas das barreiras sonoras, é necessário estabelecer um conjunto de condições padrão para determinado caso de estudo, de forma a que se chegue a conclusões mais claras. Como consequência do grande número de dimensionamentos que se pretende realizar de forma a serem analisadas várias variáveis, deverão também serem tomadas algumas simplificações, devidamente justificadas, que tornem o processo mais ligeiro.

5.4.1. ESQUEMA ESTRUTURAL

O primeiro passo para a análise estrutural será então definir de forma clara o esquema estrutural característico da barreira em estudo, de forma a compreender as transferências de esforços e os elementos que deverão ser dimensionados.

Admitindo que hipoteticamente o presente estudo teria como objectivo o desenvolvimento, por parte de determinada empresa, de barreiras pré-fabricadas, torna-se vantajoso a utilização de esquemas estruturais que permitem uma simples pré-fabricação e instalação. Por outro lado, para que tornem o estudo mais fiável e rigoroso, esse esquema deve permitir uma boa compreensão do seu comportamento estrutural.

Tendo estes factores em conta, e considerando toda a informação exposta ao longo do capítulo anterior, a utilização do esquema estrutural poste-painel (Fig. 110) parece ser a escolha mais natural, pelo que admitir-se-á este mesmo esquema ao longo das futuras análises.

Admitir-se-á, então, a existência de postes, assentes em fundações com sapata contínua, os quais apoiarão os painéis, que serão encaixados entre estes.

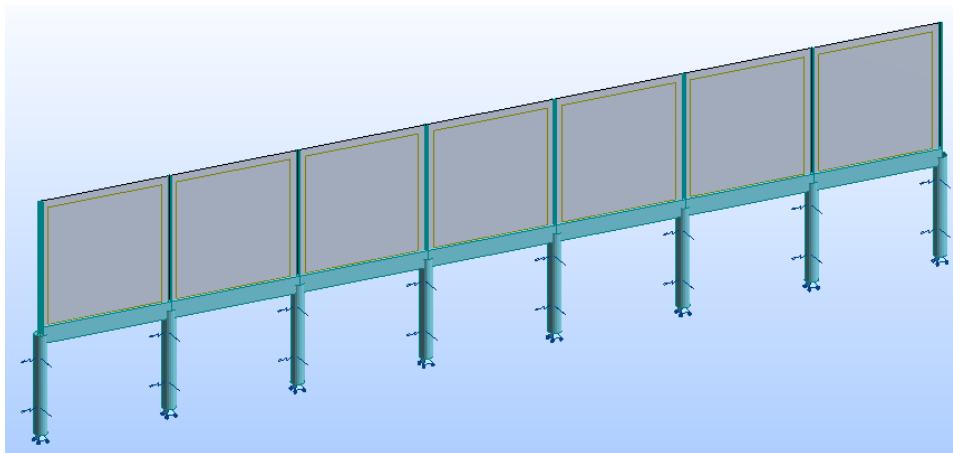


Fig. 110– Esquema estrutural adoptado

Admite-se ainda que a fundação confere a rigidez necessária para que sejam criadas condições de encastramento perfeito na base do poste, e que a ligação entre o painel e os postes permitirá a rotação do primeiro. Não existirá qualquer tipo de ligação directa entre a base do painel e a sapata contínua. De uma forma geral o painel encontrar-se-á simplesmente apoiado em extremidades opostas, na ligação com os postes, enquanto que as outras duas extremidades se encontraram livres.

5.4.2. MATERIAL

O passo seguinte será então efectuar a escolha do tipo de material. Como foi exposto no final do capítulo anterior, após análise da grande quantidade de soluções existentes em barreiras sonoras, parece vantajoso para o presente estudo a utilização do betão armado. Por um lado, é um material cujo comportamento mecânico resulta mais fidedigno em relação às previsões de projecto, pelo que se torna mais fácil de estudar. Por outro, as suas boas capacidades resistentes tornam-no num material naturalmente adequado para suportar as novas exigências impostas pelas cargas estudadas neste trabalho.

O betão armado é um material que poderá ser facilmente dimensionado para diferentes cargas, utilizando apenas pequenos ajustes na geometria e na armação das estruturas, o que se torna vantajoso para a análise paramétrica que se pretende. Informações sobre os seus componentes, nomeadamente características dos betões e armaduras, são fortemente divulgadas e facilmente encontradas no mercado, coisa que não acontecerá com materiais de soluções mais complexas.

Por tudo isto, e admitindo que este estudo teria como objectivo a pré-fabricação de barreiras sonoras por uma qualquer empresa, a simplicidade e fiabilidade do betão armado tornam-no no material escolhido para as barreiras sonoras em estudo.

Admitiu-se então que a barreira sonora seria constituída por painéis e postes dimensionados em betão armado. Em relação às características do betão armado a ser utilizado, teve-se em consideração as seguintes especificações:

- betão, dos painéis e postes, de classe C25;
- aço de armadura do tipo A500;
- utilização das malhas rectangulares electrosoldadas Malhasol para a armação dos painéis;
- utilização de varões de aço de diâmetros variáveis para a armação dos pilares.

O processo de escolha destes produtos teve em consideração o tipo de soluções disponíveis no mercado e as que têm vindo a ser mais adoptadas no design das tradicionais barreiras sonoras em betão armado.

5.4.3. MEDIDAS GEOMÉTRICAS

Têm ainda que ser definidas as várias medidas geométricas que caracterizam a barreira sonora, nomeadamente, altura e espessura e comprimento dos painéis e secção e altura dos pilares, que iram interferir na distribuição de esforços e resistências dos seus elementos.

A variação destas medidas vão ser, no entanto, objecto de estudo, pelo que serão variáveis. Assim, indicações sobre elas serão expostas ao longo da análise paramétrica, a ser feita.

5.4.4. COMBINAÇÃO DE CARGAS

As barreiras deverão suportar as cargas horizontais variáveis criadas pelas pressões aerodinâmicas, que surgem pela passagem dos veículos (aqui denominada de q_a), e pelas acções do vento (aqui denominada de q_w) (Fig.111), que assumem as configurações expostas nos Eurocódigos. No dimensionamento deverá ser adoptada a combinação mais desfavorável entre elas

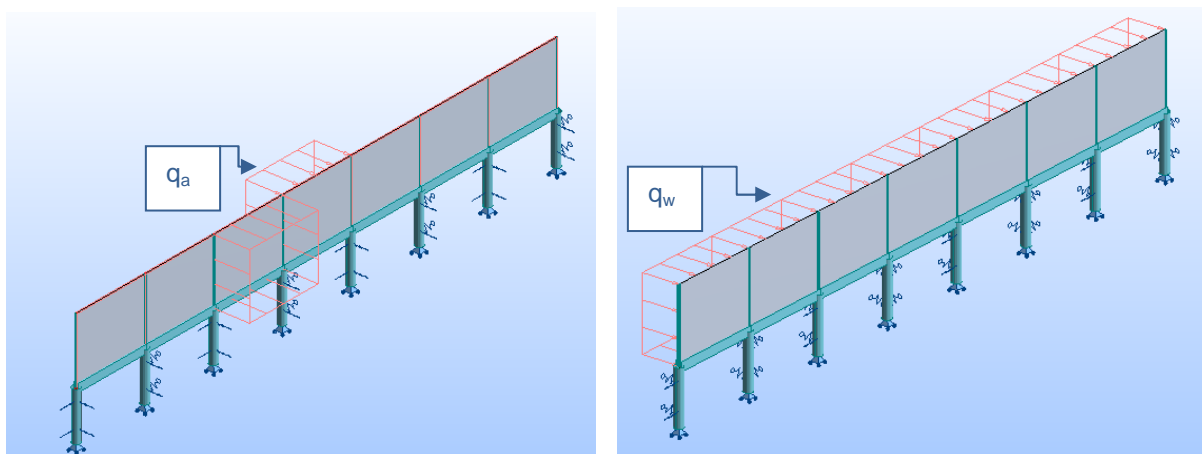


Fig. 111 – Cargas Horizontais Aplicadas à Barreira

Em relação às cargas verticais, estas deverão reduzir-se ao peso próprio. No caso dos painéis, devido ao muito elevado valor do factor h/b , a resistência aos momentos criados pelo peso será geralmente garantida em conjunto com a armadura dimensionada para as cargas variáveis. No caso dos postes, o peso próprio tomará configuração favorável, pelo que, pelo lado da segurança, este não deverá ser considerado.

A acção do vento assume uma configuração de carga distribuída ao longo de toda a barreira, e poderá actuar dos dois lados da barreira.

O cálculo das várias pressões dinâmicas do vento para diferentes Zonas e rugosidades está representado no quadro 7. Verifica-se que até uma altura de 10 metros, onde se enquadram as barreiras sonoras, as pressões são constantes. Lembra-se ainda que estes valores, segundo o RSA, não são as pressão finais, mas sim as dinâmicas que deverão ainda ser multiplicadas pelos coeficientes de forma, que serão diferentes em estruturas de centro e de extremidade, como já explicado.

Na análise paramétrica será considerado um valor fixo da acção do vento. Essa acção será calculada considerando as condições territoriais mais desfavoráveis estipuladas no Eurocódigo. Assim, admite-se que a barreira poderá ser instalada em territórios classificadas por zona B, em que a rugosidade tomará a forma de tipo II.

Quadro 7 – Valores da pressão dinâmica do vento para diferentes Zonas e rugosidades

Zona	Altura	Rugosidade	Pressão Dinâmica do Vento (kN/m ²)
A	Até 10 m	II	0,9
A	Até 10 m	I	0,7
B	Até 10 m	II	1,08
B	Até 10 m	I	0,84

Adoptando, segundo o estipulado no quadro 6 e na Fig.106, um valor de 0,8 e 1,2 para o coeficiente de forma das estruturas internas e de extremidade respectivamente, a pressão do vento final adoptada será igual a 0,864 para as primeiras, e 1,296 para as segundas.

A pressão aerodinâmica é, na prática, uma carga móvel, que percorre a barreira à velocidade da passagem do comboio. Assim, deve-se proceder ao dimensionamento na situação em que esta esteja posicionada de forma mais desfavorável ao elemento estrutural em questão.

De referir que na prática a ocorrência da acção do vento em simultâneo com a pressão aerodinâmica actuante sobre a superfície interna da barreira não poderá ocorrer. Resultando as duas em movimentações de ar, uma anulará a outra ou vice versa, daí não ser lógico a consideração das duas em simultâneo. No entanto, e partindo do pressuposto que por um lado o vento poderá actuar dos dois lados da barreira e, por outro, à pressão aerodinâmica se sucede uma sucção de sentido oposto, a consideração anterior, na prática, não toma qualquer importância, visto, neste caso, o vento poder-se combinar na superfície exterior com as cargas equivalente resultantes dessa mesma sucção, que tomam valor igual à pressão aerodinâmica como exposto em EN 1991-2 (Fig.108).

No caso dos painéis não haverá dúvidas que a posição da carga móvel responsável pela criação dos maiores esforços será quando ela se localizar distribuída ao longo de toda a largura do painel, como representado na Fig. 112.

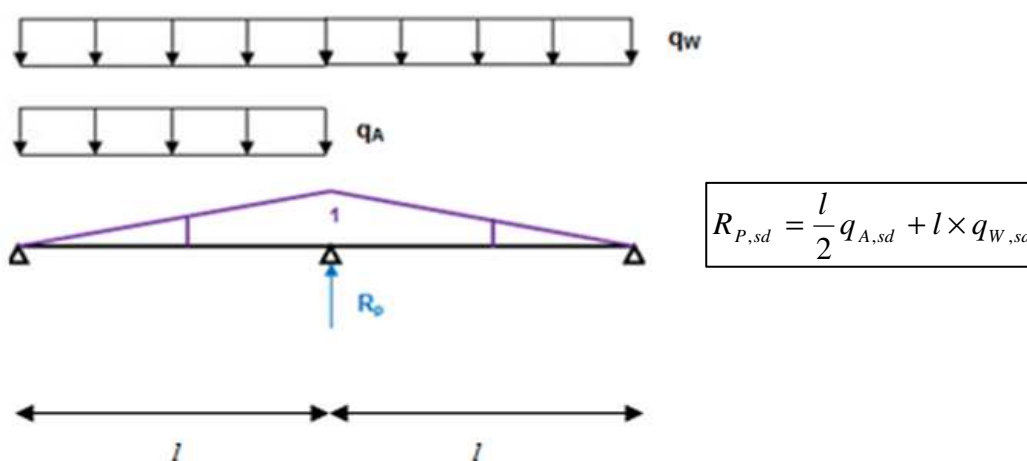


Fig. 112 – Cálculo da reacção do pilar no caso da resultante da sucção aerodinâmica se encontrar a meio da largura do painel

Por sua vez, a análise da posição da carga mais desfavorável na criação de esforços nos pilares, numa primeira abordagem, não será assim tão clara. Intuitivamente poderia pensar-se que seria quando a resultante da sucção aerodinâmica actuasse directamente no pilar. No entanto, a resultante da pressão de sentido contrário pode tornar esta posição a não mais desfavorável. Tendo isto em consideração procedeu-se a uma análise da linha de influência da reacção do poste para conhecer a posição mais desfavorável dessa sucção aerodinâmica. Considerou-se então as duas posições que levantariam mais dúvidas e procedeu-se ao cálculo da reacção do poste causada pelas pressões nos painéis, segundo o método da linha de influência, como se verifica na Fig. 112 e 113.

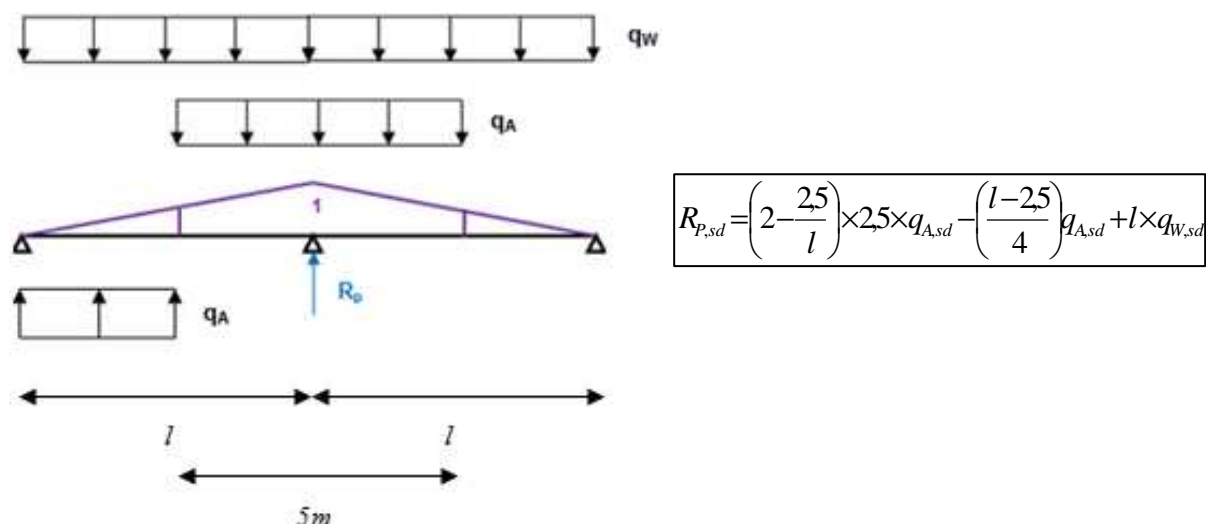


Fig. 113 – Cálculo da reacção do pilar no caso da resultante da sucção se encontrar sobre o poste

Estas cargas deverão ser combinadas segundo a combinação fundamental para a correcta análise do estado limite último. Admitindo que, como geralmente costuma acontecer, no caso da existência de ventos muito fortes, a velocidade máxima de serviço na linha seja reduzida por questões de segurança à circulação dos comboios, considerou-se aceitável a redução da acção do vento através do factor ψ_0 , quando combinada com a pressão aerodinâmica. Tendo isto em consideração, os valores de $q_{A,sd}$ e $q_{W,sd}$, segundo as normas do Eurocódigo expostas em 5.3.4, assumem a forma das equações 16 e 17 respectivamente.

$$q_{A,sd} = 1,5 \times p_A \quad (16)$$

$$q_{W,sd} = 1,5 \times \psi_0 \cdot p_A \quad (17)$$

Da mesma forma, utilizando as devidas fórmulas já indicadas em 5.3.4, se pode calcular as diferentes combinações para a análise dos estados limites de serviço.

Quadro 8 – Valores recomendados dos coeficientes ψ

Acções	ψ_0	ψ_1	ψ_2	Anexo
Acção do Vento	0,6	0,2	0	EN 1990 A1.1
Efeitos Aerodinâmicos	0,8	0,5	0	EN 1990 A2.2

Os factores Ψ , como já dito, podem ser encontrados nos anexos da EN 1990. Em relação à acção do vento, pode-se também encontrar estes valores no RSA. Os factores Ψ recomendados estão então expressos no quadro 5, bem como os respectivos anexos de onde foram retirados.

5.4.5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DOS CÁLCULOS DE ESFORÇOS E ARMADURAS

Considerando o que foi admitido em relação ao sistema estrutural, admitir-se-á que os painéis se encontrarão simplesmente apoiado nos pilaretes. Assim, o cálculo dos momentos nos painéis é facilitado, reduzindo-se à aplicação da fórmula (18), correspondendo p_{sd} à pressão no painel e l a distância entre pilaretes.

$$M_{sd} = \frac{p_{sd} \times l^2}{8} \quad (18)$$

As armaduras serão então dimensionadas de forma a que o momento resistente criado por elas seja superior ao momento de cálculo. O momento resistente tem por base a aplicação da fórmula de equilíbrio de tensões na secção do painel para o estado limite último (19), representando z o braço entre as tracções e compressões, f_{yd} a resistência de cálculo do aço e A_s a área total de aço.

$$M_{Rd} = z \times l \times f_{yd} \times A_s \quad (19)$$

Em relação aos pilaretes, o dimensionamento será feito com base no momento máximo aplicado à base destes, momento esse calculado pela aplicação da fórmula (20).

$$M_{sd} = \frac{p_{sd} \times l^2}{2} \quad (20)$$

As armaduras serão calculadas pela expressão (21). O valor de ω , presente nas respectivas tabelas de dimensionamento em função do μ (22), será obtido pela aplicação da fórmula simplificada (23), de forma a ser aligeirado o processo de análise paramétrica. As corresponderá à área total de aço, d à altura útil da secção, b à largura desta, e f_{cd} à resistência de cálculo do betão.

$$A_s = \omega \times d \times b \times \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (21)$$

$$\mu = \frac{M_{sd}}{b \times d^2 \times f_{cd}} \quad (22)$$

$$\omega = \mu(1 + \mu) \quad (23)$$

No caso dos pilares serão também dimensionadas as armaduras de resistência ao corte, que se obtêm segundo a aplicação das regras do Eurocódigo 2, através das expressões (24) e (25), onde o esforço de corte de cálculo, V_{sd} , deverá ser inferior aos resistentes, $V_{Rd,s}$ e $V_{Rd,Max}$.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \times z \times f_{ywd} \times \cot \theta \quad (24)$$

$$V_{sd,Max} = \frac{\alpha_{cw} \times b_w \times z \times f_{cd}}{\cot \theta} \quad (25)$$

A fórmula (24) permite o cálculo do espaçamento da armadura a adoptar, enquanto que em (25) é garantido o não esmagamento das escoras de betão formadas, formadas a um ângulo θ .

5.5. CÁLCULO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conhecendo as condições gerais para a análise estrutural de uma barreira sonora para vias de alta velocidade, pode-se então pensar em como o dimensionamento é afectado pelos vários parâmetros físicos que caracterizam essa mesma via ou barreira.

Neste estudo pretende-se então a análise da variação de vários factores que influenciem directa ou indirectamente as cargas aplicadas nos elementos estruturais das barreiras, ou a sua resistência. Os factores que se farão variar serão então os seguintes:

- velocidade máxima de serviço da linha;
- distância da barreira ao eixo da ferrovia;
- espessura, largura e altura dos painéis;
- esquema estrutural.

A velocidade máxima e a distância da barreira ao eixo, segundo o estipulado em 5.3.3, vai ter influência directa na pressão aerodinâmica resultante da passagem do comboio. A largura, altura e esquema estrutural dos painéis influenciará a distribuição dos esforços nestes e nos postes. Por fim, a espessura dos painéis estará directamente relacionada com a sua resistência mecânica.

O estudo será feito para velocidades de um gama de 120 a 300 km/h, e para distâncias de 6 a 1,5 metros. Em relação às distâncias da barreira ao eixo, distâncias menores que 2 metros não serão aconselháveis e, por vezes, como é o caso alemão (B. Hoffmeister, 2007), proibidas. No entanto, neste estudo, considerando condições extremas, como por exemplo o caso de pontes demasiadamente apertadas, decidiu-se prolongar a análise da influência dessas distâncias até um mínimo de 1,5 metros.

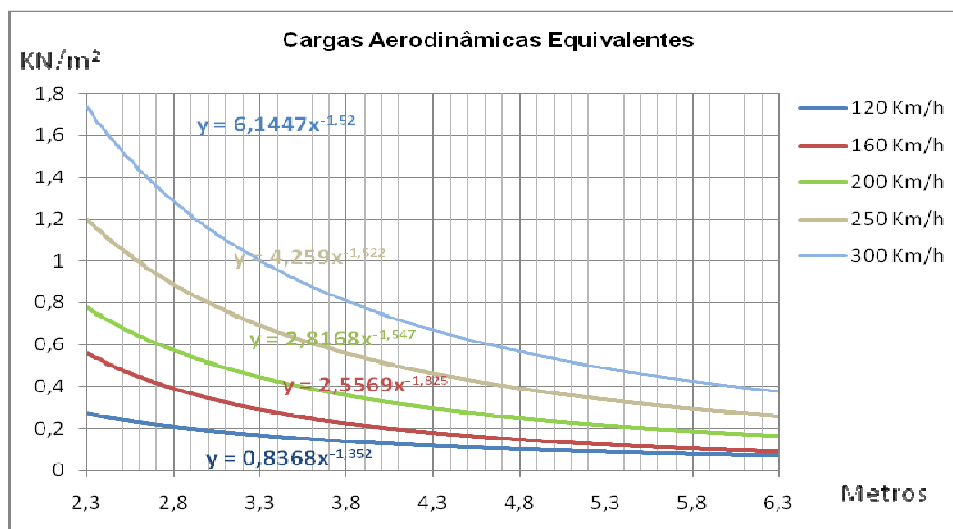


Fig. 114 – Cargas Aerodinâmicas Equivalentes

De forma a ser mais fácil a análise da influência da velocidade máxima de serviço e da distância da barreira ao eixo da ferrovia, reproduziu-se o gráfico presente na EN 1991-2, apresentado na Fig. 108, de forma a obter as funções aproximadas que dão as cargas equivalentes (Fig. 114), que apesar de sujeitas a erros, estes certamente serão bem menores que no caso dessas cargas serem retiradas directamente do gráfico.

Em cada caso de estudo será feito o dimensionamento separadamente para as estruturas interiores e para as de extremidade, considerando, como já foi exposto, os efeitos acrescidos resultantes, por um

lado, da interrupção da propagação da onda de pressão/sucção ao longo da barreira e, por outro, dos fenómenos de turbulência ocorridos pela acção do vento sobre as zonas de extremidade das estruturas.

No âmbito deste trabalho são considerados como pilaretes de extremidade aqueles que dão apoio aos painéis de extremidade, sendo analisado o que está sujeito a maiores esforços, ou seja, o que também dá apoio ao painel imediatamente anterior.

5.5.1. BARREIRA COM 5 METROS ENTRE POSTES

A primeira análise foi feita a uma barreira que para além das condições já referidas em 5.4 tem painéis de 12 centímetros de espessura, 5 metros de altura e 5 metros de largura, com o objectivo de igualar a geometria carregada pelas pressões aerodinâmicas, permitindo assim avaliar os momentos máximos nos painéis criados por estas.

Esta análise servirá também como análise padrão, para futuras comparações com outras análises paramétricas, de forma a serem tiradas conclusões acerca da influência dos vários parâmetros.

O dimensionamento passará pelo cálculo das armaduras necessárias para que com essas dimensões os painéis possam resistir aos esforços a que serão sujeitos, e a variação dessa mesma armadura em várias condições de velocidade e proximidade

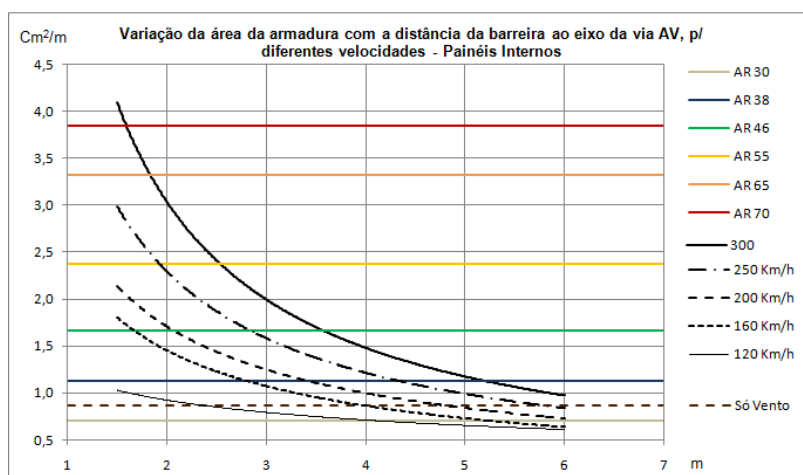


Fig. 115 – Variação da área da armadura para painéis internos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço

Pretende-se a análise da conformidade do uso de armaduras nos painéis dentro da gama das rede electrosoldadas Malhasol para se obter as resistências necessárias.

Na Fig. 115, pode-se então analisar a evolução da área de armadura em painéis internos necessária ao incremento das cargas impostas pela proximidade da barreira ao eixo da via de alta velocidade. Considerando o exposto no parágrafo anterior foram também representadas as áreas de armadura disponíveis pela gama Malhasol, de forma a que seja possível uma mais fácil análise da solução de dimensionamento a utilizar.

É também representada a área de armadura dimensionada considerando apenas a existência da acção do vento. Verifica-se de facto que para baixas velocidades ou grandes distâncias a não consideração da carga criada pela pressão aerodinâmica combinada com a acção do vento torna-se desfavorável, pelo

que o dimensionamento deverá ser feito apenas para esta última acção. De facto para velocidades máximas de serviço de 120 Km/h mesmo para barreiras muito próximas à linha, a influência da pressão aerodinâmica não deverá ser tomada em conta. Para velocidades acima dos 160 Km/h e para distâncias menores que cerca de 5 metros, a combinação da pressão aerodinâmica com a acção do vento torna-se, no entanto, fundamental.

Uma diferente abordagem é feita no gráfico da Fig. 116, onde se representa os valores das áreas da armadura em função das velocidades máximas, para cada distância ao eixo da via. Esta abordagem permite através da análise da linha de tendência a previsão do aumento da carga para além das velocidades estipuladas no Eurocódigo. Isso torna-se interessante tendo em consideração a rápida evolução dos transportes de alta velocidade, sendo que já é apontado os 360 Km/h como a velocidade de serviço comercial do futuro da AV.

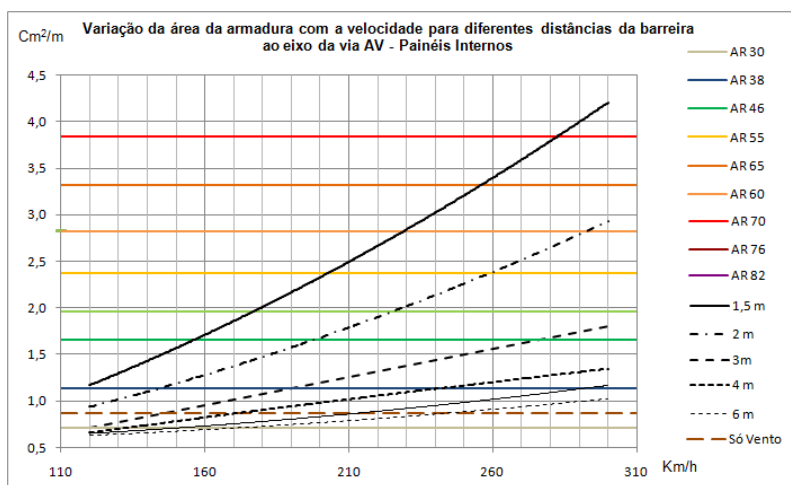


Fig. 116 – Variação da área da armadura para painéis internos com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV

Foi feito o mesmo tipo de análise agora para os painéis de extremidade, que sendo sujeitos aos fenómenos já falados, deverão ser dimensionados separadamente. Essa análise está representada na Fig. 117 e 118, em função da distância e a velocidade, respectivamente.

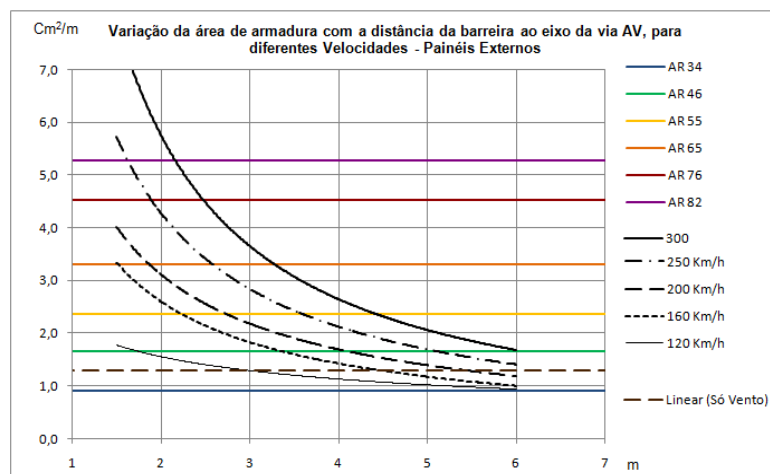


Fig. 117 – Variação da área da armadura nos painéis externos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço

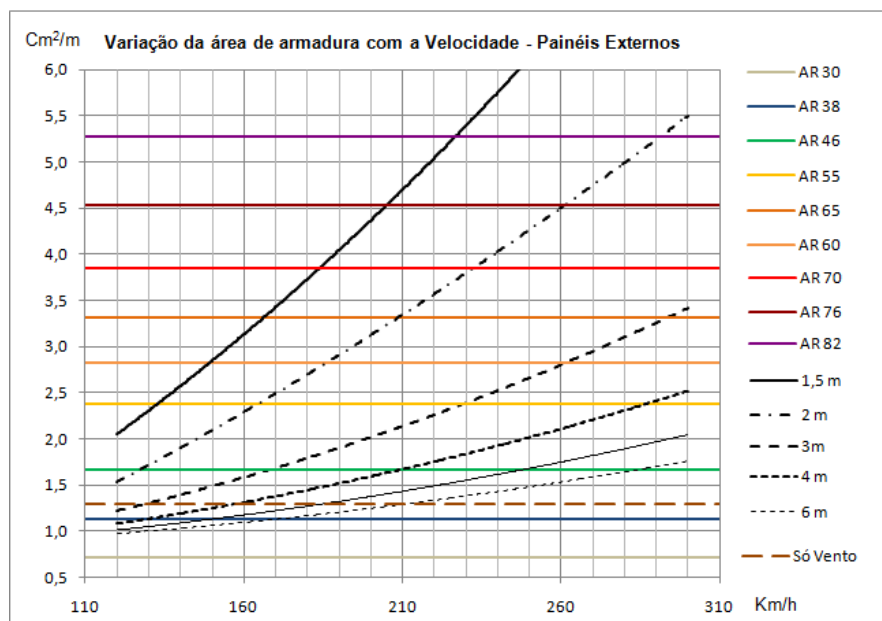


Fig. 118 – Variação da área da armadura para painéis de extremidade com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV

Em relação aos painéis internos (Fig. 115 e 116) verifica-se que, para a geometria adoptada, a combinação de cargas mais desfavorável não deverá levantar grandes problemas de dimensionamento, visto que em termos gerais a gama de armaduras Malhasol cobre as necessidades impostas pelas cargas. Mesmo para distâncias muito curtas, menores que dois metros, a rede electrosoldada mais resistente, AR 82, deverá ser suficiente para assegurar a sua segurança.

No que se refere aos pilares de extremidade (Fig. 117 e 118), verifica-se de facto que os fenómenos aí ocorridos são preponderantes no seu dimensionamento e, se não forem correctamente tidos em conta, poderão representar grandes problemas estruturais. As armaduras necessárias para a combinação de cargas resultantes de velocidades acima dos 250 km/h, para situações de necessidade de grande proximidade da barreira à via, nomeadamente a partir de distâncias de 2 metros, tornam-se demasiadamente elevadas para a utilização da rede electrosoldada Malhasol.

Conclui-se, então, que no caso dos painéis centrais da barreira, de dimensões 5000*5000*12 mm, o seu dimensionamento torna-se viável através da simples utilização dos vários tipos de malha rectangular de armaduras Malhasol. No entanto, tal não acontece em relação aos painéis de extremidade, que estando sujeitos a maiores cargas, para certas condições de proximidade à via, e para velocidades consideráveis, as armaduras Malhasol são insuficientes para o correcto comportamento estrutural da barreira. Considera-se, no entanto, que a instalação de barreiras muito próximas a vias com velocidades muito elevadas não será, na prática, frequente.

No entanto, no caso dos painéis externos sujeitos a condições extremas, que por esse motivo serão sujeitos a esforços demasiadamente grandes para a segurança ser verificada pela utilização das armaduras Malhasol, deverão, então, serem tomadas medidas complementares de dimensionamento. São exemplos, o aumento da dimensão da espessura do painel, que permitirá mobilizar uma maior área de betão resistente, ou a utilização de novas soluções de armadura, nomeadamente a possível utilização de varões adicionais de pré-esforço, situação frequentemente utilizada.

De seguida passará a ser feito o mesmo tipo de análise, mas desta feita em relação aos postes que suportarão os painéis. Também aqui será necessária uma análise separada entre postes internos e de extremidade.

Tendo em consideração um rápido pré-dimensionamento e as informações acerca das vulgares formas geométricas, que caracterizam os postes em barreiras sonoras, foi adoptada a secção representada na Fig. 119, para o dimensionamento das armaduras.

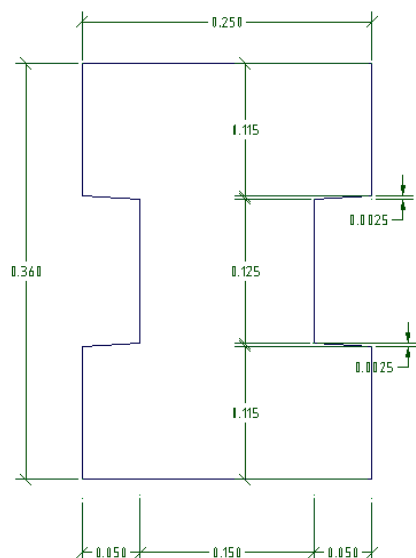


Fig. 119 – Secção admitida do Pilarete de suporte dos painéis

Adoptando o processo já exposto em 5.4.5, procedeu-se então ao cálculo das armaduras em função das velocidades e distâncias já referidas, exposto nas Fig. 120 e 121.

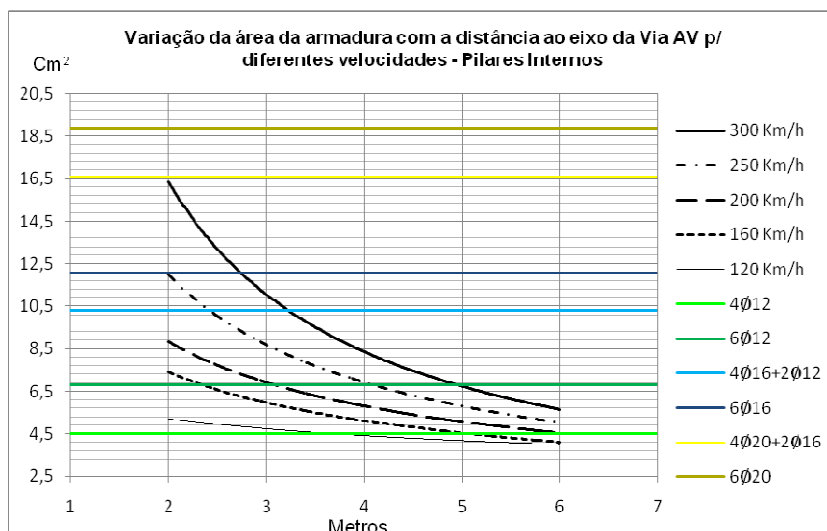


Fig. 120 – Variação da área da armadura para pilares internos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço

As linhas coloridas, da mesma forma que aconteceu para o caso dos painéis, representam as áreas de vários dimensionamentos adoptados, de forma a que seja possível chegar-se a uma rápida solução, apenas pela análise do gráfico. Assim, após o cálculo das armaduras necessárias a certo sistema de cargas, basta localizar a sua área nos intervalos do gráfico e escolher a solução de armadura que se encontra no limite de cima desse mesmo intervalo.

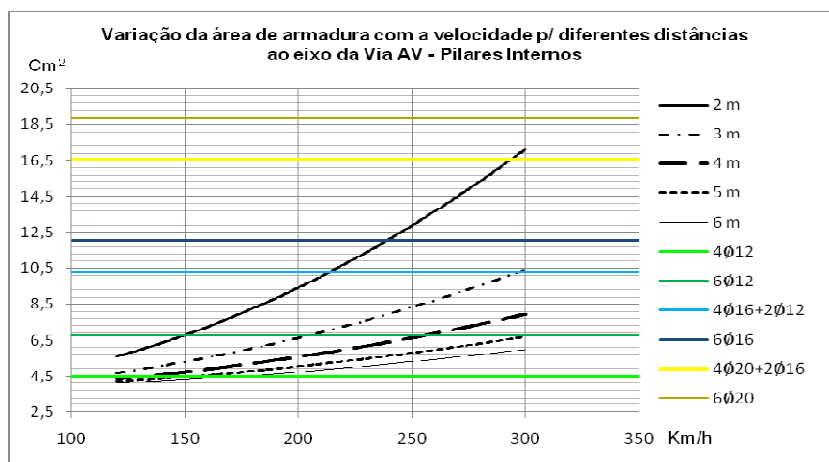


Fig. 121 – Variação da área da armadura para pilares internos com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV

Repare-se que foram adoptadas soluções de armadura com varões de aço numa gama de diâmetros de 12 a 36 mm, agrupados em grupos de 6 com o mesmo diâmetro, ou em grupos de 4+2 de diferentes diâmetros.

No caso dos pilares não foram consideradas distâncias da barreira ao eixo da via menores que 2 metros, por ser considerado que a instalação de barreiras a tão baixa distância seria na prática pouco viável. Por outro lado, a criação de momentos demasiadamente elevados, devido aos métodos simplificados no cálculo das armaduras, poderia resultar em resultados pouco fiáveis.

Procedeu-se apenas ao cálculo da armadura à flexão de um dos lados do pilarete, admitindo, à posteriori, a mesma quantidade de armadura no lado contrário, sabendo que o vento poderá soprar indiscriminadamente dos dois lados.

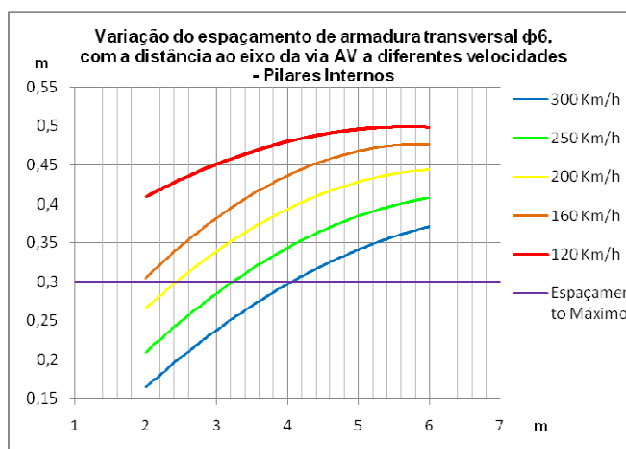


Fig. 122 – Variação do espaçamento dos estribos em pilares internos com a distância ao eixo da via AV a diferentes velocidades

Feito o dimensionamento de resistência aos momentos, passa-se à necessária análise dos estribos que garantam a correcta resistência ao corte. Esta análise está presente no gráfico da Fig. 122, considerando a utilização de varões de aço de 6 mm de diâmetro, sob a forma da variação do espaçamento necessário entre estribos desse tipo, para os vários casos em estudo.

Admitiu-se, segundo as considerações construtivas do Eurocódigo 2, que o espaçamento máximo entre estribos será de 0,3 metros, limite esse também representado na Fig. 122.

Verifica-se, então, que, considerando os pilaretes internos com as dimensões apresentadas, se chega a tipos de solução perfeitamente viáveis, mesmo para distâncias curtas e velocidades muito elevadas. Assim considera-se a secção dos pilaretes aceitáveis.

Utilizando, como exemplo, uma barreira que esteja instalada a uma distância de 4m do eixo de uma via de alta velocidade, cuja velocidade máxima de serviço seja de 300 Km/h, deveria-se recorrer a postes que suportassem os seus painéis internos, com as dimensões apresentadas na Fig. 120, uma armadura total de $8\phi 16+4\phi 12$ e com uma solução de estribos de $\phi 6$ espaçados de 0,25 metros.

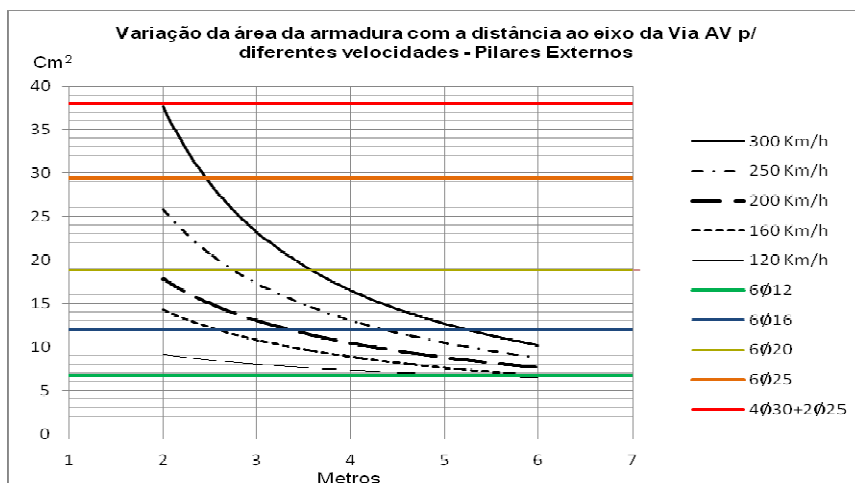


Fig. 123 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço

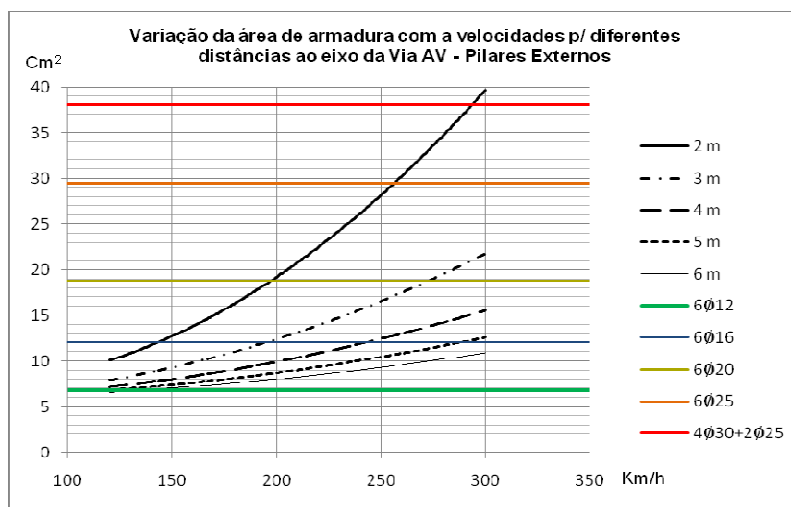


Fig. 124 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV

Da mesma forma que acontece com os painéis, a mesma análise deverá ser feita para o dimensionamento de pilares externos, que deverão resistir a cargas maiores resultantes das pressões nos painéis. Essa análise foi então feita, e as conclusões poderão ser tiradas pelo estudo dos gráficos das Fig. 123 e 124.

Verifica-se que, como seria de esperar, as exigências se tornam significativamente maiores neste caso. De facto, para situações muito exigentes as soluções de armadura necessária tornam-se demasiadamente pesadas para a geometria dos pilaretes. No entanto, admitindo que para velocidades demasiadamente grandes não será frequente a instalação de barreiras demasiadamente próximas à via, a secção adoptada não se torna preocupante.

Em relação aos estribos, estas novas exigências vão-se verificar de forma significativa nos espaçamentos entre varões. No entanto, em termos construtivos, não é levantado qualquer problema, como se verifica pela análise da Fig. 125.

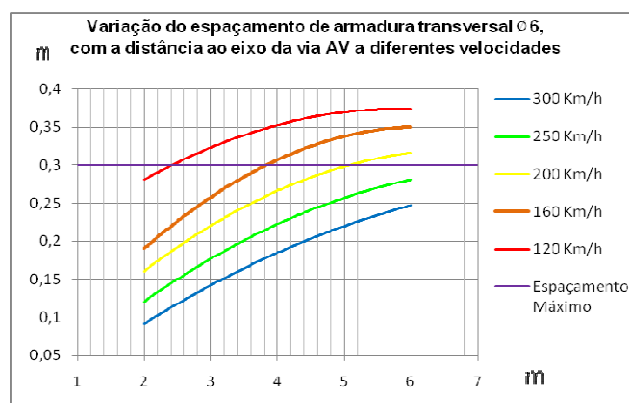


Fig. 125 – Variação do espaçamento dos estribos em pilares de extremidade com a distância ao eixo da via AV a diferentes velocidade

Assim, e admitido, tal como nos pilaretes internos, uma situação exemplo de 4 metros de distância e uma velocidade máxima de serviço de 300 km/h, ter-se-ia que adoptar uma solução de armadura total de $8\phi 20 + 4\phi 16$, com armadura transversal de $\phi 6$ de 2 ramos espaçada de 0,15 metros.

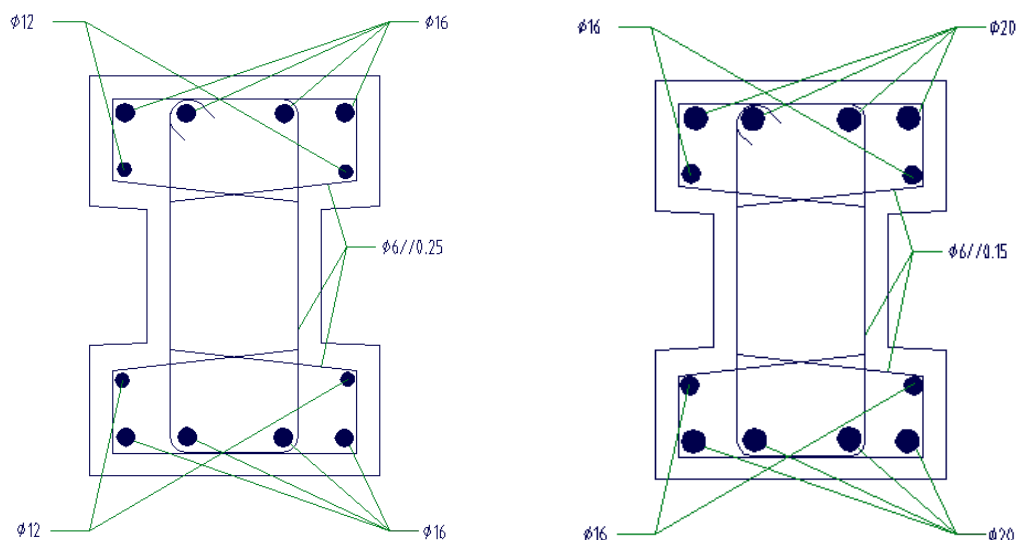


Fig. 126 – Soluções de armadura para os pilaretes internos à esquerda e de extremidade à direita

As soluções de armadura para os exemplos apresentados em pilaretes internos e de extremidade estão representadas na Fig. 126.

De referir que a posição mais desfavorável das cargas foi calculada tendo por base o método da linha de influência, exposto em 5.4.4, chegando-se à conclusão que o dimensionamento deveria ser feito para a posição da área de pressão aerodinâmica como exposto na Fig. 113.

5.5.2. BARREIRA COM 15 CM DE ESPESSURA DE PAINEL

Na análise feita no ponto anterior verificou-se problemas de conformidade da utilização da gama de armaduras Malhasol para resistir aos momentos criados nos painéis com 12 cm de espessura, nas situações mais desfavoráveis. Assim, sentiu-se necessidade de proceder à mesma análise, considerando desta feita painéis com a mesma área de superfície, recorrendo, no entanto, a espessuras maiores. Neste ponto estudar-se-á então a evolução da necessidade de armadura utilizando painéis com espessuras de 15 cm.

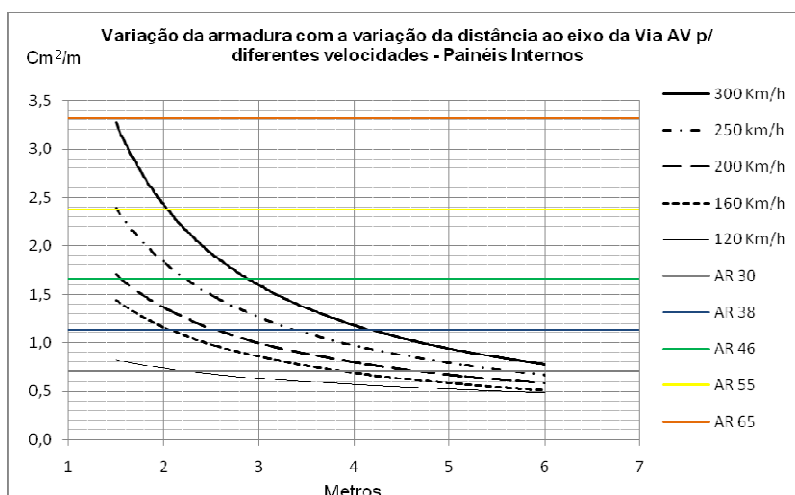


Fig. 127 – Variação da área da armadura para painéis internos com 15 cm de espessura com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço

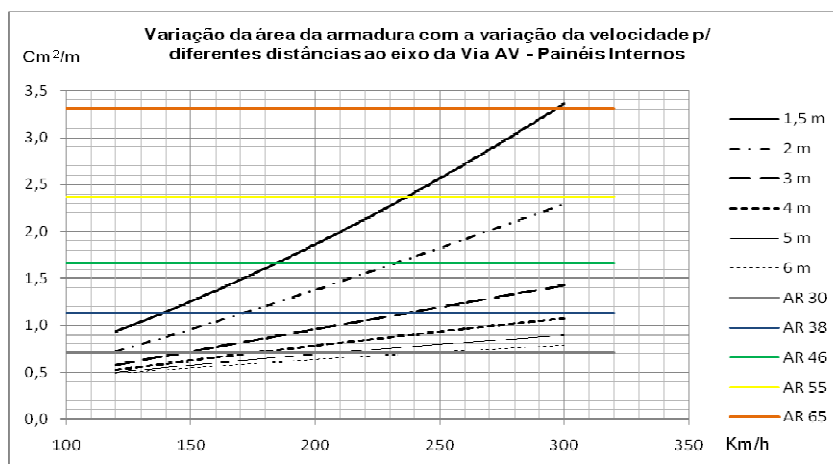


Fig. 128 – Variação da área da armadura para painéis internos com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV

Na Fig. 127 e 128 estão presentes os resultados da análise nas condições referidas para painéis que se localizem no interior da barreira. Estes painéis, não levantando grandes problemas de dimensionamento da solução de armadura Malhasol no caso de espessuras de 12 cm, muito menos levantarão no caso de utilização de espessuras de 15 cm, como, de facto, se verifica nos resultados apresentados. Com a utilização da rede electrosoldada AR 65 é possível cobrir-se a necessidade de todas as armaduras para os casos de estudo apresentados, mesmos naqueles em que as condições são extremas.

Em relação aos painéis externos, a análise dos resultados, presentes nas Fig. 129 e 130, leva a concluir que nem com o aumento de 3 centímetros da espessura do painéis, se culmata a necessidade de armadura acima da gama das redes Malhasol. De facto verifica-se que na proximidade de 2 metros de distância à via, para velocidades máximas de serviço de 300 km/h a necessidade de armadura continua a ser demasiadamente grande.

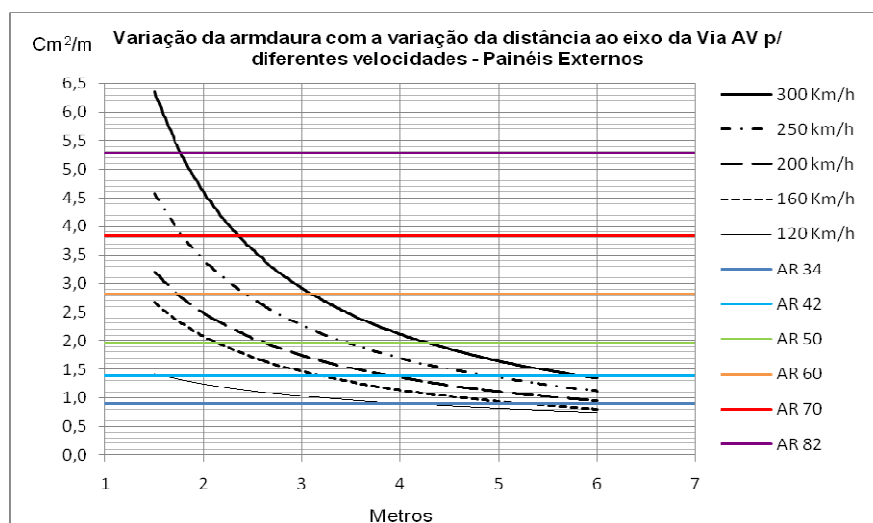


Fig. 129 – Variação da área da armadura para painéis de extremidade com 15 cm de espessura com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço

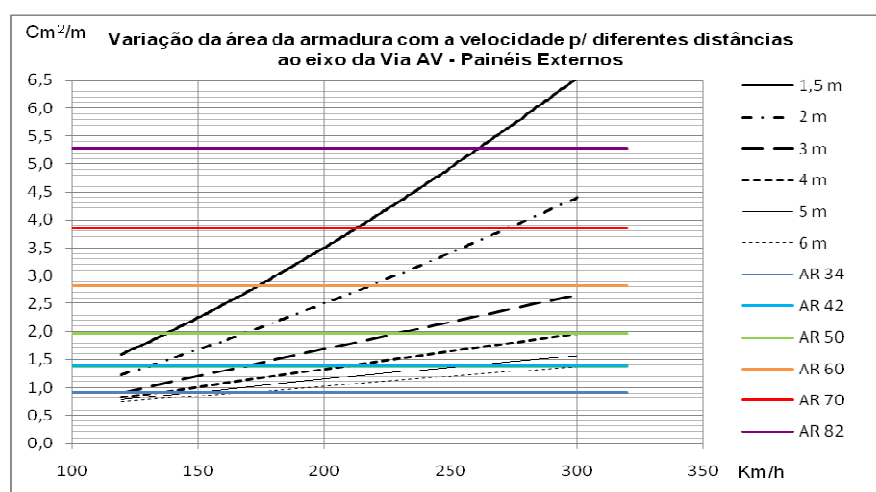


Fig. 130 – Variação da área da armadura para painéis internos com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV

Neste caso não foi feito qualquer dimensionamento para os pilaretes, considerando que não alterando o vão criado pelos painéis entre eles, a carga a que estes estariam sujeitos seria naturalmente a mesma que no ponto anterior. Teria, no entanto, que ser alterada a altura da secção de forma a ser possível o encaixe destes novos painéis, mas, significando isso um aumento da resistência do painel, não se torna necessário proceder ao seu dimensionamento.

5.5.3. BARREIRA COM 4 METROS ENTRE POSTES

Outra forma de se fazer reduzir os esforços nos painéis passará pela diminuição do vão formado pelos painéis entre postes. Assim, de seguida, far-se-á a análise de painéis com a mesma altura e espessura que em 5.5.1, mas de largura inferior, mais concretamente 4 metros.

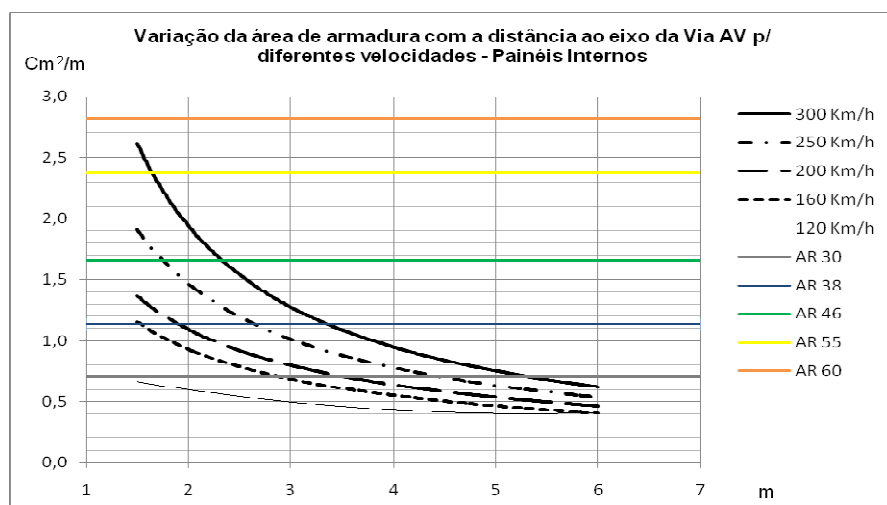


Fig. 131 – Variação da área da armadura para painéis internos de 4 m de largura com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço

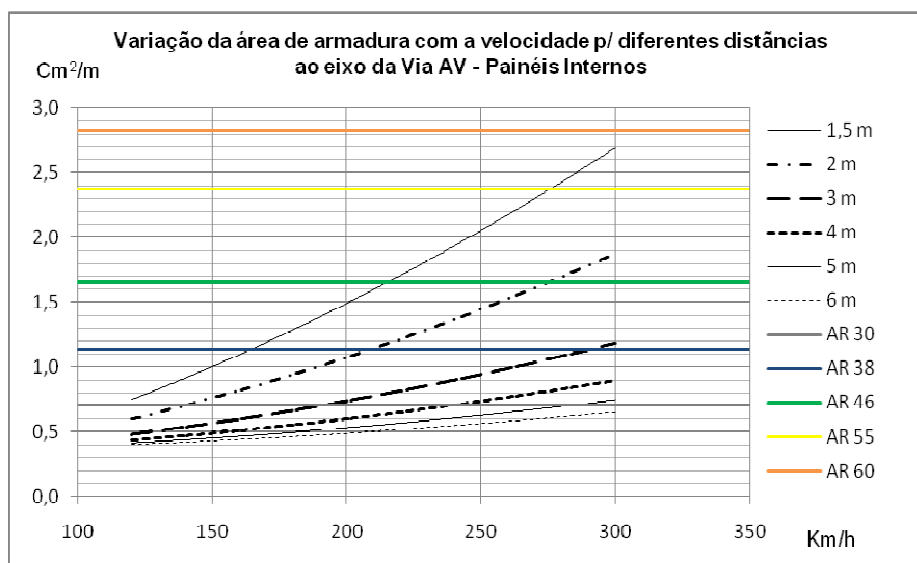


Fig. 132 - Variação da área da armadura para painéis internos de 4 m de largura com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV

Pela análise das Fig. 131 e 132, são evidentes os ganhos na poupança de armadura em relação aos resultados dos painéis com 5 metros de largura (Fig. 115 e 116). Enquanto que, neste caso, a rede electrosoldada AR 60 cobre todas as necessidades de armaduras das condições em estudo, no primeiro haveria necessidade de utilização da classificação Malhasol superior.

Estas vantagens são também bem evidentes na análise dos painéis de extremidade, onde pela primeira vez se consegue superar as suas necessidades de armadura para as situações mais extremas, com a simples utilização das soluções permitidas pela gama das redes electrosoldadas Malhasol. De facto, verifica-se nas Fig. 133 e 134, que com a utilização da rede mais apertada dos catálogos Malhasol o dimensionamento dos painéis, com as dimensões apresentadas, de barreiras de grande proximidade a vias com velocidades de serviço grande, é satisfeito.

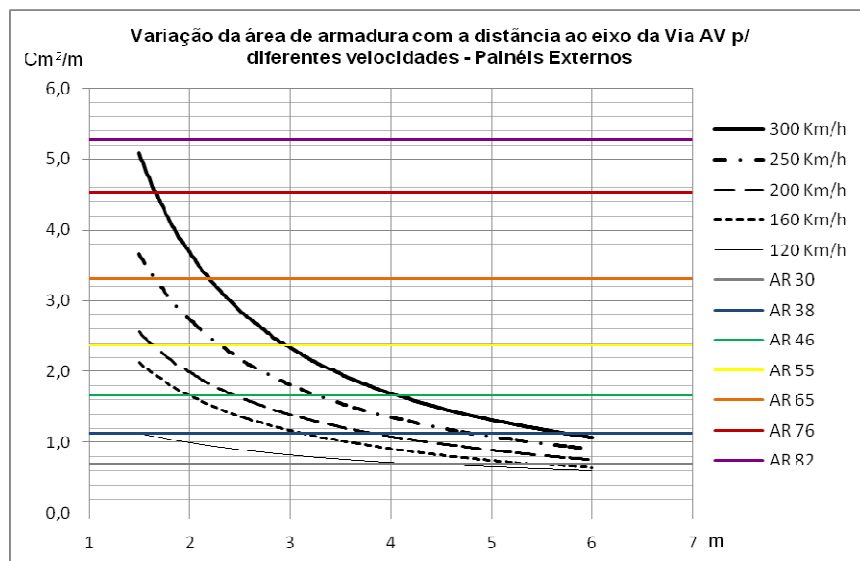


Fig. 133 – Variação da área da armadura para painéis de extremidade de 4 m de largura com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço

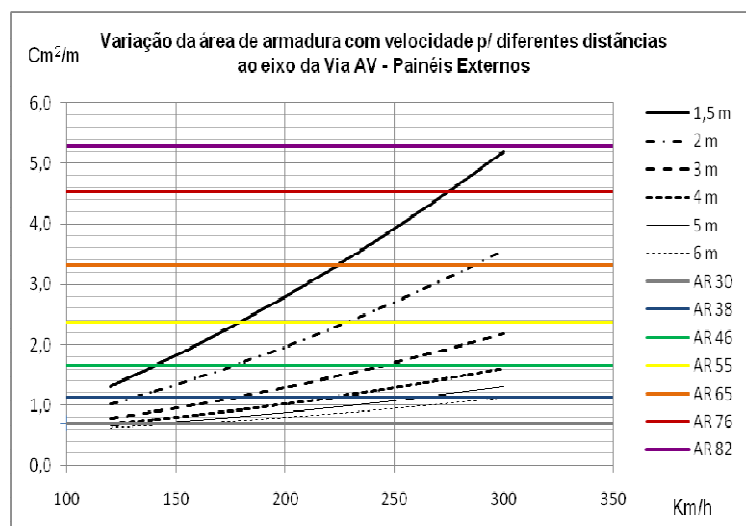


Fig. 134 – Variação da área da armadura para painéis de extremidade de 4 m de largura com as velocidades máximas de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV

Estas vantagens resultam na diminuição dos momentos máximos como resultado da diminuição do vão carregado criado pelo painel. Poder-se-ia esperar, então, que os postes seriam sujeitos também eles a esforços significativamente menores, pelo que poderiam ser aligeirados nas armaduras. No entanto, curiosamente, quando se procede à análise dos pilaretes que apoiam os painéis com as dimensões apresentadas neste ponto, verifica-se que a diminuição de esforços nestes dá-se de forma muito pouco significativa e, portanto, terão de mobilizar áreas de armadura muito semelhantes para obterem a resistência requisitada, como se poderá concluir pela análise dos gráficos das Fig. 135 e 136.

Este curioso fenómeno, que se traduz na diminuição pouco significativa dos esforços nos pilaretes internos com a diminuição do vão dos painéis, deve-se à menor área carregada pelas pressões aerodinâmicas de sentido favorável, que acontece quando se utiliza a combinação de cargas na posição da Fig. 113, que é de facto, pela análise da linha de influência, a posição mais desfavorável.

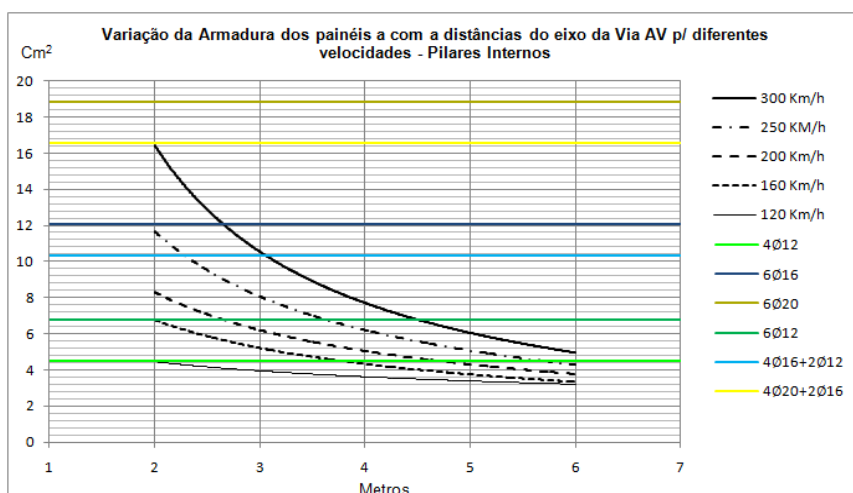


Fig. 135 – Variação da área da armadura para pilaretes internos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço, em painéis de 4m de largura

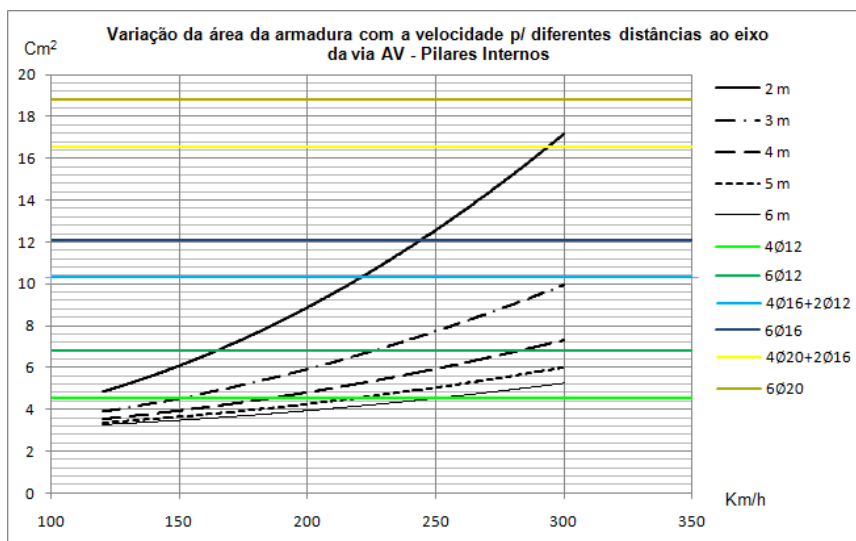


Fig. 136 – Variação da área da armadura para pilaretes internos com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV, em painéis de 4 m de largura

Essa diferença quase inexistente traduz-se na prática da adoção de soluções de armadura à flexão virtualmente iguais. Isto pode ser confirmado, por exemplo, para uma velocidade de 300 Km/h a uma distância de 4 metros ao eixo da via, onde se pode adotar a utilização de uma armadura à flexão total de $8\phi 16+4\phi 12$, igual à do ponto 5.5.1.

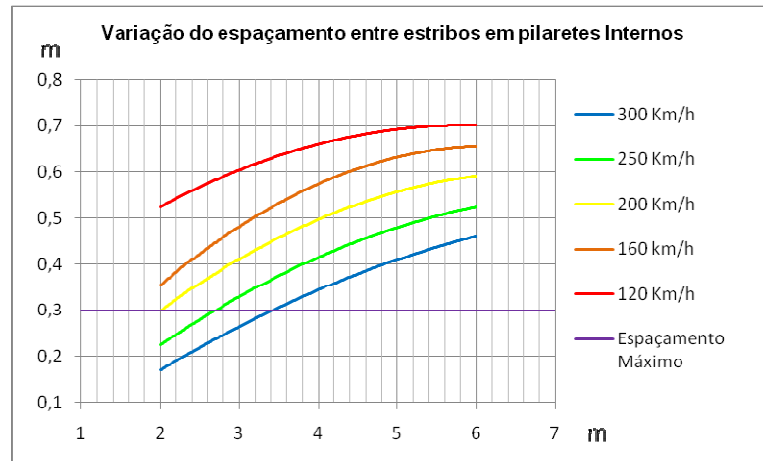


Fig. 137 – Variação do espaçamento dos estribos em pilaretes internos com a distância ao eixo da via AV a diferentes velocidade no caso de painéis com 4 m de largura

Foram também feitas as análises da armadura de esforço transversal a instalar, e verifica-se na Fig. 138 que a pequena diminuição de esforços nos postes se traduzem igualmente em pequenos aumentos no espaçamento entre estribos. A solução a adotar no exemplo apresentado passaria pela utilização de estribos de 2 ramos com 0,3 metros de espaçamento.

No caso dos pilaretes de extremidade verifica-se que os esforços, resultantes da descarga dos painéis com 4 metros de largura diminuem ainda mais insignificativamente do que no caso dos internos, quando comparados com os resultados da utilização de vãos de 5 metros. Estas conclusões podem facilmente ser tiradas pela análise da Fig. 138 e 139.

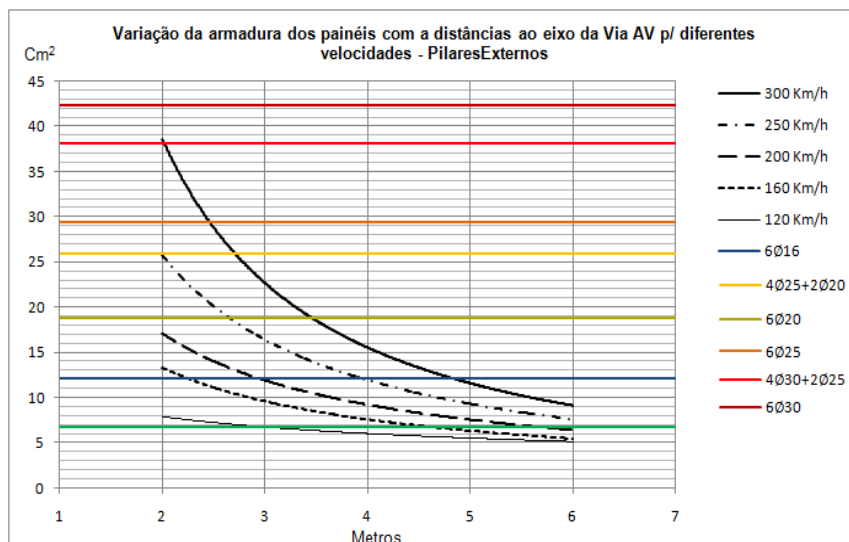


Fig. 138 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço, em painéis de 4m de largura

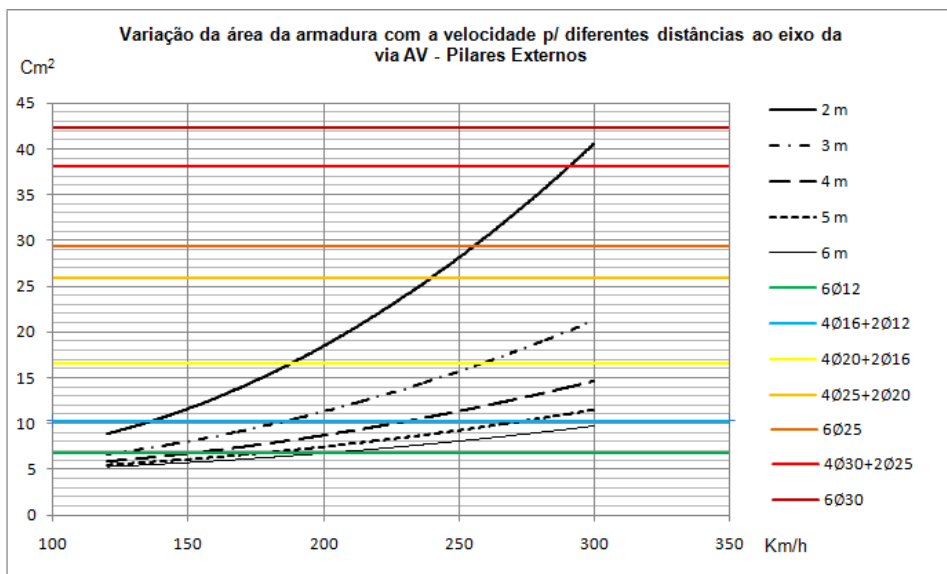


Fig. 139 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV, em painéis de 4 m de largura

Tal fenómeno tem origem nos diferentes pesos assumidos pela pressão aerodinâmica e pela acção do vento, como se verifica através da simplificação da análise da linha de influência apresentada na Fig. 114, através das equações 25 e 26, que representam a reação do pilarete no caso da utilização de 5 ou 4 metros de vão, respectivamente.

$$R_{P,sd} = 3,125 \times q_A + 5 \times q_W \quad (25)$$

$$R_{P,sd} = 3,375 \times q_A + 4 \times q_W \quad (26)$$

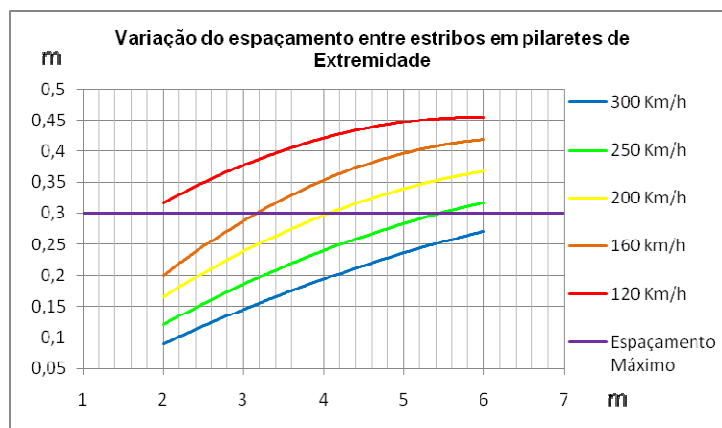


Fig. 140 – Variação do espaçamento dos estribos em pilaretes de extremidade com a distância ao eixo da via AV a diferentes velocidade no caso de painéis com 4 m de largura

Verifica-se, de facto, necessidades de armadura muito semelhantes às do pilarete de extremidade dimensionado em 5.5.1. De facto, considerando o exemplo que tem vindo a ser apresentado, essa virtual semelhança traduz-se na prática num tipo de solução de armadura à flexão exactamente igual à do caso da utilização de painéis com 5 metros de largura, ou seja 8Ø20+4Ø16. Em relação aos

estribos, como se verifica pela análise da Fig. 140, o espaçamento a ser verificado é também relativamente maior, mas na prática traduz-se na mesma solução, ou seja, aplicação de estribos de dois ramos $\phi 6$ com espaçamento de 0,15 metros.

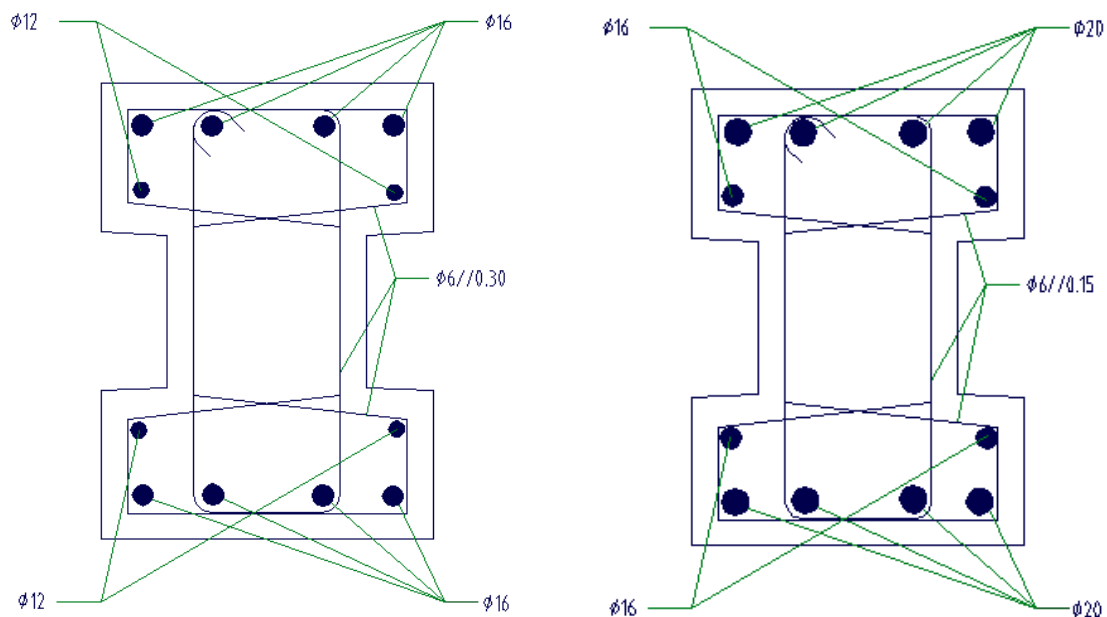


Fig. 141 - Solução da armadura dos pilaretes internos, à esquerda, e de extremidade à direita, para a utilização de painéis de 4 metros de largura

As soluções de dimensionamento dos pilaretes internos e externos, considerando a utilização de painéis com 4 metros de largura, estão então representadas na Fig. 141.

5.5.4. BARREIRA COM 7 METROS DE ALTURA

Já foram estudadas as influências da alteração da espessura e largura dos painéis no dimensionamento da armadura que garanta as resistências requisitadas. Assim, faltarão apenas a análise da influência da última medida geométrica que resta, a altura.

Percebe-se que, na prática, a alteração desta medida não terá qualquer influência na criação dos momentos máximos a que os painéis se sujeitam. De facto, o que acontece é que a partir dos 5 metros de altura o painel encontrar-se-á apenas sujeito às cargas resultantes da acção do vento, o que acabará por diminuir esses mesmos momentos flexionais a partir dessa altura. Para alturas bem maiores que os 5 metros poder-se-á até talvez pensar recorrer a dispensa da armadura para fins económicos. No entanto, admitindo uma altura de 7 metros, não será aqui estudada essa hipótese.

Admitindo, portanto, painéis que além dos 7 metros de altura possuam as mesmas medidas do caso do ponto 5.5.1, as soluções de armadura nos painéis serão exactamente as mesmas.

A alteração da altura influenciará, no entanto, os momentos criados nos postes, como resultado da alteração do braço da força resultante. De facto, o aumento da altura dos painéis, implicará que os pilaretes deverão resistir não apenas à combinação das duas pressões aplicadas nos painéis (vento e pressões aerodinâmicas) a uma altura de 5 metros, como a um incremento de 2 metros de painel sujeito apenas à acção do vento, cuja resultante terá um braço ainda maior.

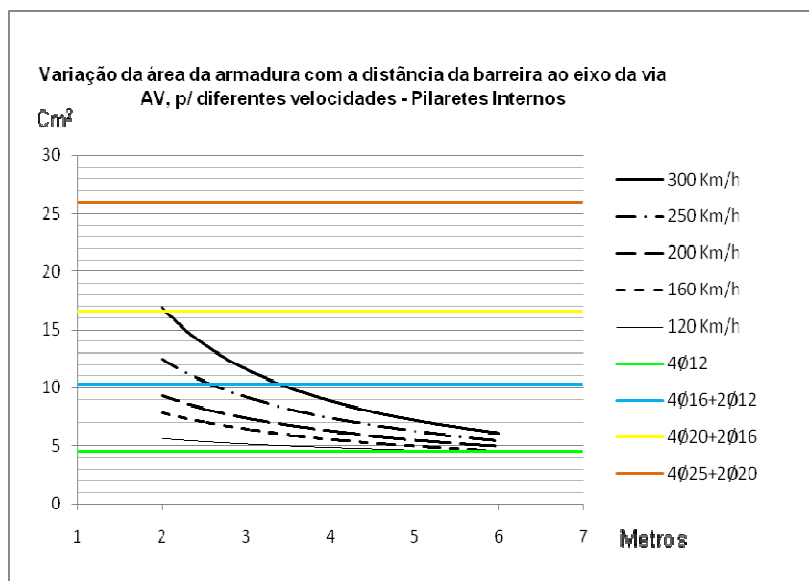


Fig. 142 – Variação da área da armadura para pilaretes internos com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço, em painéis de 7 m de altura

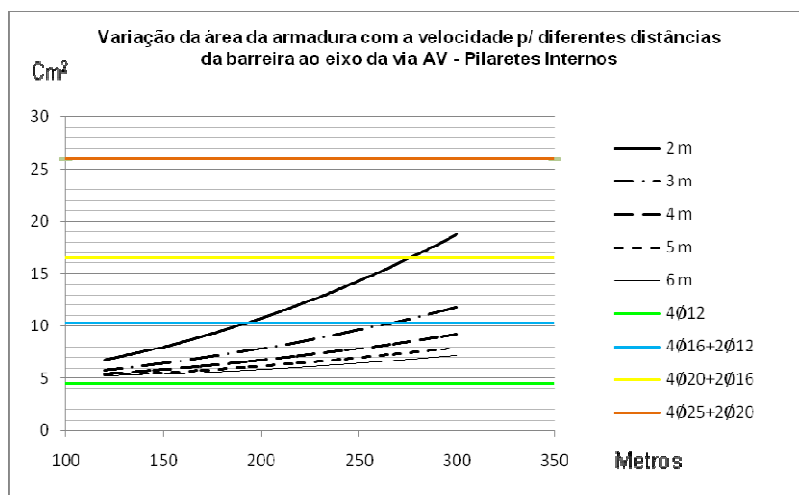


Fig. 143 – Variação da área da armadura para pilaretes internos com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV, em painéis de 7 m de altura

Verifica-se, no entanto, pela análise das Fig. 142 e 143, que este incremento de momentos que resulta do aumento de 2 metros de altura de painel, traduz-se também ele num aumento pouco significativo da área de armadura necessária em pilaretes internos. De facto, comparado com painéis com apenas 5 metros de altura, o gráfico cresce muito pouco, que na prática deverá ter influências muito pequenas nas soluções de armadura a adoptar entre uma situação e outra.

Procedendo ao dimensionamento para o mesmo exemplo de barreiras a 4 metros de vias com velocidades de serviço de 300 Km/h, verifica-se de facto que a solução adoptada para alturas de 5 metros se revelará da mesma forma adequada a esta situação. Solução essa que passaria pela aplicação de 8Ø16+4Ø12.

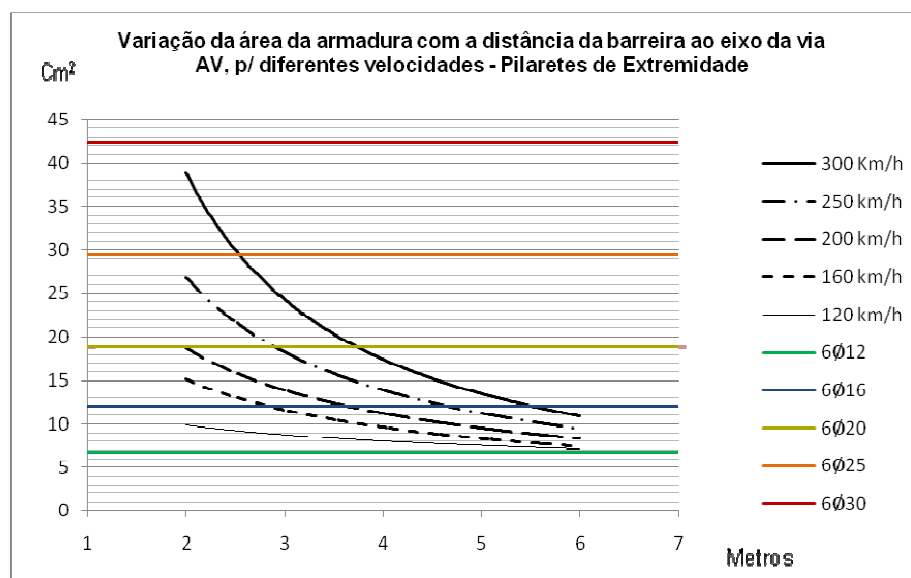


Fig. 144 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a distância da barreira ao eixo da via AV, para diferentes velocidades máximas de serviço, em painéis de 7m de largura

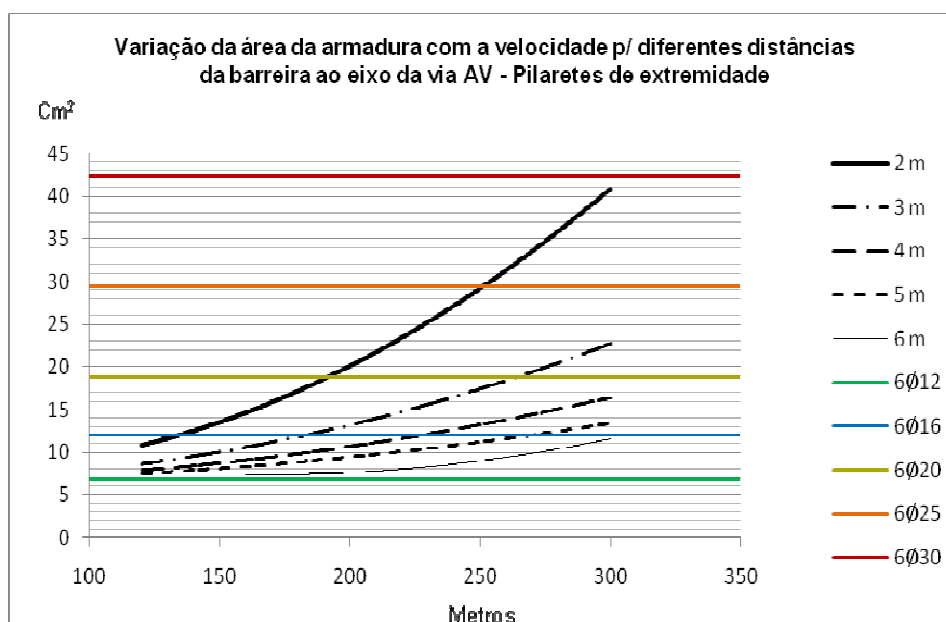


Fig. 145 – Variação da área da armadura para pilaretes de extremidade com a velocidade máxima de serviço, para diferentes distâncias da barreira ao eixo da via AV, em painéis de 7 m de altura

A armadura dimensionada para os pilaretes de extremidade em 5.4.1 para 4 metros de distância a 300 km/h de velocidade de serviço torna-se, no entanto, neste caso demasiadamente perto do limite de resistência requerida. Assim, apesar do incremento de momentos criado pelo aumento da altura do painel ser muito pequena, irá traduzir-se numa solução de armadura mais pesada. Como se poderá concluir pela análise da Fig. 144, e 145, dever-se-á recorrer a uma solução do tipo 12Ø 20.

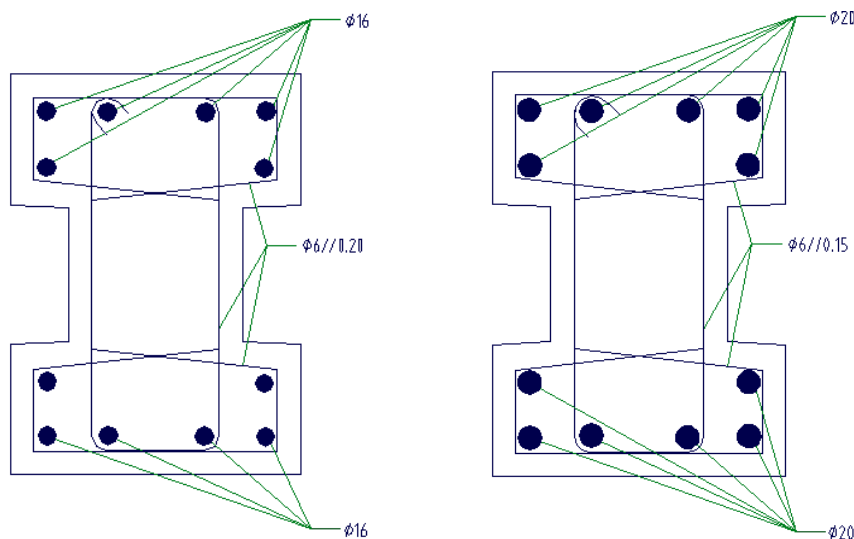


Fig. 146 – Soluções de armadura para os pilares internos, à esquerda, e de extremidade, à direita, de suporte a painéis de 7 metros de altura

As soluções de armadura de painéis internos e de extremidade estão, então, representadas na Fig. 146.

5.5.5. BARREIRA SIMPLEMENTE APOIADA EM 3 LADOS

Será agora feita a análise para a hipotética situação de utilização de painéis que, para além de serem apoiados nos pilares, sejam também apoiados na base, por exemplo, na sapata quando esta é contínua, através da instalação de algum tipo de conectores.

Será óbvia a conclusão acerca da diminuição de momentos no painel que resulta como consequência da instalação deste novo apoio. No entanto, essa redução relacionar-se-á também com a altura do próprio painel, sendo que quanto maior a sua altura menor a influência deste apoio na diminuição dos momentos nos pontos mais altos do painel.

A análise desses mesmos momentos torna-se, para este esquema estrutural, significativamente mais complicada. Recorreu-se, então, à utilização do software Robot de forma a se proceder à aplicação do método dos elementos finitos ao painel, com o objectivo de se analisar os esforços criados com a adopção deste novo tipo de esquema estrutural. Essa análise foi feita para as situações em que se utilizem alturas de painel de 5 e 7 metros, de forma a serem avaliadas as vantagens de utilização deste novo apoio a várias alturas. As restantes condições geométricas serão as mesmas em relação ao estudo padrão realizado em 5.5.1.

Na Fig. 147, pode-se então proceder à análise de elementos finitos dos momentos criados num painel interno de altura 5 metros, para uma barreira que se localize a 4 metros de distância do eixo de uma ferrovia de alta velocidade que se caracterize por velocidades regulares de serviço de 300 Km/h.

O momento máximo, que se verifica, naturalmente, no ponto mais alto do painel, a meio vão entre postes, será consideravelmente menor que o que seria esperado aquando a utilização apenas de dois apoios, nos postes. Enquanto que este último é de cerca de 5,93 kN/m, como se poderá verificar pela análise das tabelas, no Anexo AI, a utilização de um apoio na base do painel reduz-lo para 5,18 kN/m.

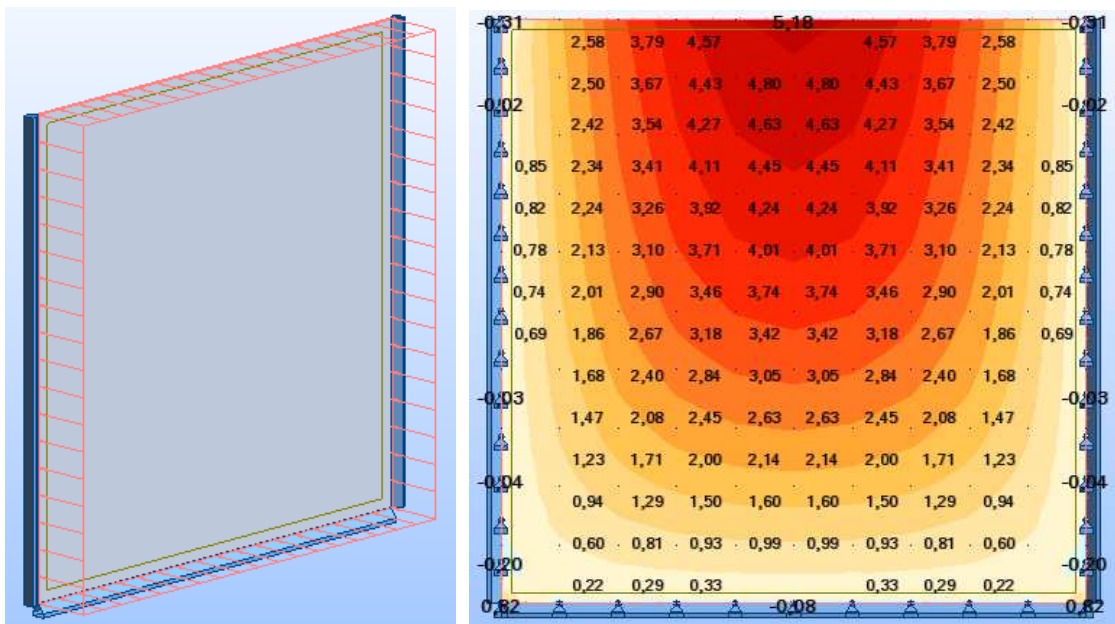


Fig. 147 – Análise pelos elementos finitos de um painel de 5m de altura apoiado em 3 lados

De seguida, procedeu-se à análise do painel também interno, no caso de este, além das medidas padrão, possuir uma altura de 7 metros, e cujos resultados se apresentam na Fig. 148. Relembra-se, no entanto, que a carga não é uniforme nesses mesmos 7 metros, sendo que a altura de aplicação das pressões aerodinâmicas tem um limite de 5 metros, pelo que os restantes dois metros serão apenas sujeitos às acções do vento.

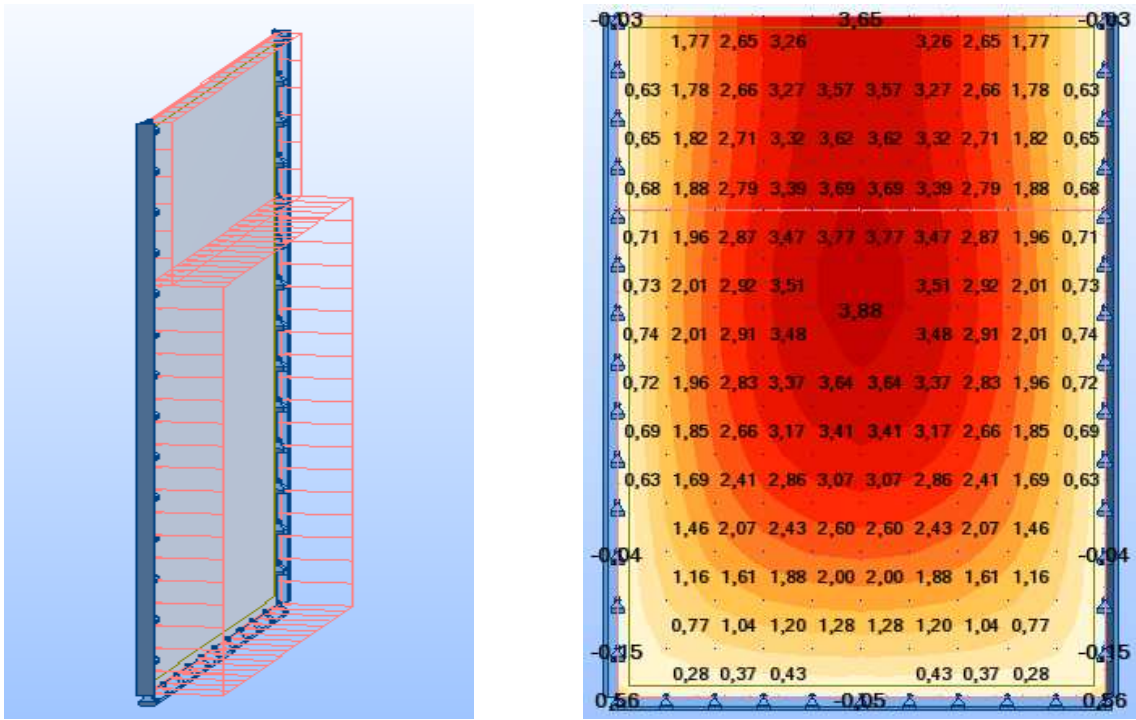


Fig. 148 – Análise pelos elementos finitos de um painel de 7m de altura apoiado em 3 lados

Curiosamente, verifica-se que o aumento da altura não se traduz no aumento do momento máximo. De facto, como consequência de a carga que actua nos dois últimos metros ser consideravelmente inferior que à dos primeiros cinco, o momento máximo será da ordem dos 3,88 KN/m, bem inferior que os 5,93 KN/m verificados no caso dos painéis internos se apoiarem única e exclusivamente em dois dos seus lados.

Com esta análise conclui-se, então, que existem de facto ganhos consideráveis na poupança de armadura quando se procede à instalação de mecanismos de apoio entre a base do painel e a fundação. Estes ganhos poderão até, curiosamente, serem ainda mais significativos com o aumento da altura desses mesmos painéis.

Para o caso padrão, seria necessário recorrer à rede de armadura AR 46, da gama Malhasol, para ser verificada a segurança ao estado limite último do exemplo que se tem vindo a considerar. No entanto, para o caso em que se aplica o terceiro apoio, um painel de 5 metros de altura a uma distância de 4 metros do eixo da via que tenha que suportar velocidades de 300 Km/h, terá apenas que recorrer à armadura AR 42 para garantir a segurança. Quando esse painel aumenta para os 7 metros, a armadura AR 38 já se torna suficiente, pelo que a poupança é visível.

Refira-se que este esquema estrutural traduz-se em vantagens apenas no caso de utilização de um painel a toda a altura, que terá sido o caso em estudo. Quando se utiliza painéis formados pelo empilhamento de subpainéis, o apoio na base so será feito ao primeiro subpainel, pelo que não trará, na prática, qualquer vantagem de aplicação.

5.5.6. ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO

Até agora sempre foi feita a análise de dimensionamento paramétrico para os estados de limites últimos, no entanto também os estados limites de serviço deverão ser cumpridos. Assim, chama-se à atenção que a utilização dos gráficos que têm vindo a ser apresentados, tendo a finalidade de fornecer uma forma rápida e eficaz de proceder aos dimensionamentos, em função de vários parâmetros, dos elementos estruturais das barreiras sonoras em alta velocidade ferroviária, não garante por sua vez o cumprimento dos limites últimos de serviço.

A fim exemplificativo, far-se-á a verificação dos estados limites de serviço para os painéis e pilaretes internos do caso padrão (painéis de 5000*5000*120 mm), do exemplo de distância e velocidades que se tem vindo a utilizar. Tal verificação deverá ter em conta os pressupostos regulamentares do Eurocódigo 2, nomeadamente na secção 7 – estados limites de utilização. É então aconselhada a verificação da conformidade dos seguintes limites de tensões:

- limite de compressão do betão (combinação característica): $\sigma_{cc} \leq 0,6f_{ck}$ (27);
- limite de compressão do betão (combinação quase-permanente): $\sigma_{cqp} \leq 0,45f_{ck}$ (28);
- limite de tracção na armadura (combinação característica): $\sigma_{cc} \leq 0,8f_{yk}$ (29).

Em relação ao painel, através da aplicação da fórmula 12, obteve-se um momento máximo característico de 1,26 kN.m, o que corresponde a tensões de compressão do betão máximas para uma espessura de 12 cm de 525 kPa, que naturalmente verifica o limite estipulado em (27).

Por sua vez, a tensão no aço resultante desse mesmo momento atingirá no máximo os 3,4 Mpa, o que estará muito longe de atingir a condição exposta em (29).

Os coeficientes Ψ_2 aplicados à combinação quase-permanente, seja em relação à pressão aerodinâmica ou seja em relação à acção do vento, assumem valor nulo. Assim sendo, os esforços e também as

tensões características valem igualmente 0, cumprindo automaticamente o estipulado na condições (28).

Em relação aos pilaretes, admitindo um pilarete interno para o exemplo apresentado, este estará sujeito a um momento característico de 75,64 kN.m, o que se traduz em tensões de cerca de 10,5MPa. Correspondendo a condição (27) a um valor de cerca de 15 MPa, o limite é satisfeito.

O aço, por sua vez, nesta combinação, estará sujeito a tensões pouco maiores que 45MPa, ainda bem menores que os 400 MPa impostos pela condição 29.

Em relação à verificação para a combinação quase-permanente, acontece o mesmo que no pilar, sendo o valor desta nula.

5.6. CONCLUSÕES

Com a alta velocidade ferroviária surgem também novos desafios às estruturas que compõem os vários elementos das linhas. Estes novos desafios deverão ser devidamente estudados e regulamentados. As barreiras sonoras, cuja instalação é essencial em vias ferroviárias e em especial na alta velocidade, não são excepção.

As velocidades elevadas que caracterizam hoje os mais avançados sistemas ferroviários são responsáveis pela criação de bruscos movimentos de ar, que se traduzem na criação de ondas de pressões e subpressões aerodinâmicas. Estas pressões que percorrem as estruturas a par do comboio criam fenómenos dinâmicos que poderão tornar-se problemáticos.

A não consideração de um correcto modelo de cálculo, que considere os efeitos acrescidos da utilização da alta velocidade para o dimensionamento das barreiras sonoras, pode-se traduzir de facto em danos múltiplos nas suas estruturas, que representarão custos avultados de reparações e substituições, como é comprovado pelo sucedido na Alemanha, na linha Cologne-Frankfurt.

Recentes actualizações têm vindo a ser feitas nos Eurocódigos, nomeadamente no EN 1991-2, de forma a criar normas de bons comportamentos a serem consideradas no dimensionamento de estruturas para alta velocidade, nomeadamente para barreiras sonoras. O Eurocódigo apresenta os modelos de cálculo que deverão ser respeitados de forma a serem considerados os efeitos resultantes da alta velocidade, através da aplicação de cargas equivalentes.

A intensidade das cargas equivalentes, segundo o mesmo Eurocódigo, estará directamente relacionada com o quadrado da velocidade máxima de serviço do comboio e com a forma aerodinâmica deste. A variação da proximidade da barreira à via assume também um papel preponderante no valor final da intensidade das cargas.

Segundo também o Eurocódigo, as estruturas de extremidade terão de suportar efeitos dinâmicos acrescidos, como resultado da interrupção da onda de pressões e subpressões. Assim, para o dimensionamento de tais elementos, as cargas equivalente deverão ser multiplicadas por um factor dinâmico igual a 2.

A acção do vento sobre as barreiras não deverá de todo ser desprezada. No entanto, verifica-se uma incompatibilidade de combinação da acção do vento com as pressões aerodinâmicas na superfície interior da barreira, visto na prática ambas não poderem actuar em simultâneo. A combinação torna-se, no entanto, possível do lado da barreira contrário à via. Isto porque quando o vento actua nesta superfície pode entrar em combinação desfavorável com a supressão resultante da passagem do comboio.

Pode-se considerar, na combinação entre vento e pressões aerodinâmicas, uma redução da acção do vento através da aplicação do seu coeficiente Ψ_0 , admitindo que não se permitirá serviços a velocidades máximas em casos da presença de vento demasiadamente forte.

Ainda em relação ao vento, deve-se ter em consideração os fenómenos de turbulência que se verificam nas extremidades das infra-estruturas. Esses fenómenos deverão entrar no cálculo das pressões do vento através do factor de forma, que deve assumir um valor maior do que no caso das estruturas centrais.

A posição mais desfavorável da superfície de cargas equivalentes, em combinação com a acção do vento, para o dimensionamento dos painéis, será aquela que permita que a resultante se encontre a meia largura destes. Admitindo que os painéis se encontrem simplesmente apoiados nos postes, os momentos máximos nos primeiros serão facilmente calculados pela aplicação das equações de equilíbrio isostático.

Em relação aos pilaretes a posição da resultante das cargas aerodinâmicas equivalentes será menos intuitiva e a sua escolha passará pela análise da linha de influência da reacção do pilarete. Para larguras estudadas de 5 e 4 metros, a reacção do pilarete será máxima quando a resultante da sucção se localizar sobre este.

Admitindo painéis de dimensões $5000 \times 5000 \times 120 \text{ mm}^3$, que são dimensões razoáveis em termos das que são vulgarmente usadas, obtém-se condições de área igual à criada pela superfície de cargas equivalentes para as pressões aerodinâmicas, servindo de caso óptimo para ser utilizado de padrão de comparação com outros tipos de geometria de painel.

Nas condições do parágrafo anterior verifica-se que para os painéis centrais, os valores dos esforços criados não representam necessidades de áreas de armadura superiores às que se podem obter dentro da gama das redes electrosoldadas Malhasol. Mesmo para condições extremas, de distâncias à via muito pequenas e velocidades de serviço muito elevadas, verifica-se, de facto, que a rede Malhasol com maior resistência (AR 82) cobre todo o gráfico de necessidades de armadura.

Em relação aos pilaretes centrais, nessas mesmas condições, verifica-se de igual forma que é possível a adopção de soluções de armadura viáveis, mesmo para as situações mais extremas. A utilização de $4\varnothing 20 + 2\varnothing 16$, em cada uma das faces do pilarete garante de facto as necessidades de resistências em todas as condições apresentadas.

Quando se fala, no entanto, nos painéis de extremidade, verifica-se, de facto, um aumento significativo de esforços, que se traduz numa também maior necessidade de armadura. Neste caso, para situações mais extremas, as redes electrosoldadas Malhasol deixam de cobrir as necessidades de armadura. Assim, seria necessário recorrer a medidas alternativas, como é exemplo a aplicação de varões pré-esforçados.

O aumento dos esforços verificados nos painéis traduz-se naturalmente no aumento da carga aplicada nos pilaretes de extremidade. E também nestes, para casos extremos as necessidades de armadura levantariam problemas de dimensionamento. Para baixas distâncias e altas velocidades ter-se-ia de recorrer a soluções demasiadamente pesadas para a secção em questão. No entanto, conclui-se também que, na prática, este tipo de condições não serão frequentes, sendo adoptadas distâncias mínimas às via na ordem dos $3/4$ metros quando estas se caracterizam por velocidades demasiadamente elevadas.

Uma solução para a diminuição das armaduras necessárias a serem aplicadas nos painéis passaria pelo simples aumento da espessura do painel. Conclui-se de facto que se verifica uma redução significativa de armadura quando se aumentou a espessura de 12 para 15 centímetros. A utilização desta medida permite a diminuição da gama Malhasol para uma solução AR 65, cobrindo de igual forma todas as necessidades de armadura, mesmo para as condições mais exigentes, em painéis internos.

Mesmo em relação aos painéis de extremidade com esta espessura, a utilização das redes Malhasol são aceitáveis, sendo que apenas para distâncias abaixo de 2 metros e velocidades de serviço acima de 300 km/h se pode encontrar inconformidades.

As soluções de armadura dos pilaretes não vão ser alteradas, com o aumento da espessura do painel visto tal medida não implicar a alteração de esforços nestes.

Conclui-se, no entanto, que existe uma medida ainda mais eficaz da redução da necessidade de armadura nos painéis. Esta passaria pela diminuição do vão criado pelo painel entre os postes. De facto verifica-se que a diminuição desse vão de 5 para 4 metros diminui consideravelmente os esforços, e consegue-se uma grande poupança de armadura. De facto, nem os painéis de extremidade levantarão algum problema de utilização das soluções Malhasol.

Esta conclusão não é tão evidente em relação aos pilaretes. De facto, devido á existência de pressões e subpressões que, portanto possuem sentido contrário, a diminuição do vão não significará necessariamente a diminuição dos esforços nos pilaretes. Neste caso, verifica-se, de facto, uma diminuição, no entanto, esta será muito pouco acentuada, resultanto, na prática, em soluções a adoptar iguais às do caso de utilização de largura de 5 metros entre painéis, quer para pilaretes internos ou de extremidade.

Foi ainda estudada a influência da altura dos painéis e, portanto também dos pilaretes que os suportam. Em relação aos painéis, admitindo o esquema estrutural que tem vindo a ser aplicado, verifica-se que não existe qualquer influência do aumento da altura nos momentos máximos, pelo que a solução de armadura não será alterada.

O aumento da altura para 7 metros traduz-se, no entanto, no aumento do braço da resultante da carga distribuída a que os pilaretes estarão sujeitos. Este facto implicará naturalmente o aumento dos momentos na base destes. No entanto, o que se conclui é que, sendo a pressão aerodinâmica aplicada a uma altura máxima de 5 metros, e sendo os outros dois metros apenas sujeitos à acção do vento, o incremento no momento final vai ser pouco significativo, o que irá implicar diferenças muito pequenas nas soluções de armadura a adoptar.

Alterou-se também o esquema estrutural, e verificou-se que a instalação de um terceiro apoio na base do painel se traduz em reduções significativas nos momentos máximos a que estes estarão sujeitos. Em painéis de 5 metros de altura estas reduções para o exemplo apresentado foram da ordem dos 13%. Curiosamente, em painéis de maiores alturas, e como resultado da menor pressão aplicada nos últimos dois metros, a redução nos momentos máximos será ainda maior, na ordem dos 35%.

6

CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÃO

Desde a revolução industrial que os transportes ferroviários tomaram um papel preponderantes nas sociedades modernas. No entanto, o que durante 100 anos foi o principal meio de transporte de massas perdeu imensa notoriedade com a comercialização em massa dos automóveis individuais e das viagens de avião.

A alta velocidade fez renascer a importância dos transportes ferroviários e tornou-os num bom concorrente para viagens de média e grande distância. Como resultado disto o interesse por este tipo de tecnologia tem vindo a crescer por todo o mundo, nomeadamente na Europa.

Logo depois do Japão ter dado o primeiro impulso na alta velocidade, através da criação do Shinkansen, o TGV francês torna-se um enorme sucesso e em pouco tempo se espalha por toda a França.

A rede do TGV (LGV) espalha-se, de facto, para fora da França, dando origens às importantes linhas transeuropeias Eurostar e Thailys. Começa a surgir então a ideia de uma rede europeia de alta velocidade ferroviária que permita o rápido transporte de pessoas e bens entre os estados da comunidade.

Hoje vários outros países europeus possuem já este tipo de tecnologia, em redes mais ou menos completas. São exemplos a Itália, Reino Unido, Alemanha e Espanha.

Portugal não quer ficar de parte da rede transeuropeia de alta velocidade e já estarão planeados três trechos em terreno nacional: Madrid-Lisboa, Vigo-Porto e Porto-Lisboa. Os dois primeiros serão os mais prioritários, sendo que o primeiro foi considerado um dos 5 projectos europeus mais importantes, o que demonstra de forma clara o interesse e o empenho da comunidade na ideia da rede europeia de alta velocidade ferroviária.

Assim, os motivos são mais que muitos para que Portugal se actualize em relação a esta nova tecnologia, pelo que os estudos nesta área se tornam essenciais, nomeadamente no ramo da engenharia civil.

O aumento da velocidade, no entanto, traduz-se na criação de novos problemas que devem ser superados. Um desses problemas será o aumento do já problemático impacto sonoro que caracteriza as ferrovias. De facto o aumento da velocidade acima dos 300 Km/h implica um aumento do ruído para valores que superam os 100 dB. Considerando que os níveis de ruído são limitados por decretos de lei que deverão ser cumpridos, este factor torna-se de facto numa grave problemática.

O principal requisito legal em vigor actualmente em relação à limitação do ruído é o Decreto-Lei n.º9/2007, de 17 de Janeiro, mais conhecido por Regulamento Geral do Ruído (RGR). Este estabelece um limite entre 45 a 65 dB, dependendo da zona e da hora a que acontece esse ruído.

No caso das fontes de ruído, como é o caso de ferrovias de alta velocidade, originarem pressões sonoras maiores que o estipulado nos requisitos legais, torna-se necessário recorrer a medidas de mitigação sonora. Essas medidas poderão actuar ao nível do planeamento do território (tornando-o mais eficaz e permitindo um menor conflito de espaços), ao nível da fonte (Rail e Wheel Dampers) ou entre a fonte e o receptor através da instalação de barreiras sonoras.

A implementação de barreiras de sonoras é, de facto, a medida de mitigação sonora mais recorrida, não só em ferrovias como também em rodovias, especialmente auto-estradas. No entanto, na mesma medida que bloqueia a propagação do som, bloqueia também o campo visual. O impacto visual causado por elas é hoje em dia, de facto, uma das principais desvantagens apontadas à sua utilização. Com objectivo de diminuir esse impacto, e de tornar as barreiras mais económicas e simples, sem por em causa o principal objectivo a que se propõem, ou seja, o isolamento acústico, foram desenvolvidas uma enormidade de soluções que variam em material, esquema estrutural, técnicas de instalação, e tratamento estético.

Verifica-se, no entanto, que várias das soluções serão adequadas apenas para contextos muito específicos, e apresentam desvantagens que não as tornam práticas na maioria das situações. Conclui-se, como consequência disso, que as soluções mais viáveis, e que, portanto, serão mesmo as que mais se recorre a nível nacional, passaram pela utilização de painéis em betão armado ou de caixões metálicos, apoiados entre postes. De facto, a simplicidade de instalação, as vantagens económicas, e os bons isolamentos acústicos que resultam da utilização destas soluções, tornam-nas adequadas para a maioria das situações.

A utilização de painéis em betão armado é, de facto, a base para um grande tipo de soluções, sendo alterado apenas o tipo de revestimento que confere à barreira a absorção desejada. As vantagens do material betão armado são desde há muito conhecidas e, as elevadas resistências e a fiabilidade do cálculo do seu comportamento mecânico, tornam-no, de facto, num material ideal para barreiras que sejam sujeitas a cargas significativas, como acontece em vias de alta velocidade.

A alta velocidade traduz-se em novas exigências estruturais de todos os elementos que constituem as suas vias. As barreiras sonoras não são excepção e, de facto, as velocidades elevadas criam novos fenómenos a serem considerados no seu dimensionamento.

Recentes danos em barreiras sonoras como consequência da inadequação dos antigos regulamentos em relação aos modelos de carga a considerar nestas, resultaram em actualizações nos eurocódigos, nomeadamente na EN 1991-2, de forma a serem considerados correctamente todos os efeitos que resultam das altas velocidades.

De facto, as estruturas de proximidade a este tipo de vias estará, segundo o EN 1991-2 de 2005, sujeito a um fenómeno de criação de ondas de pressão e sucção, que deve ser considerado no dimensionamento dessas estruturas, através de um modelo de cargas equivalentes.

Esse mesmo Eurocódigo relaciona a intensidade das cargas equivalentes com o quadrado da velocidade máxima de serviço e a forma aerodinâmica do comboio. Esta intensidade estará também naturalmente ligada com a proximidade da barreira à ferrovia, sendo que, à medida que esta se localiza mais perto da via a intensidade aumenta de forma exponencial. É ainda aconselhado a que no caso de elementos de extremidade se multiplique o modelo de cargas por um factor dinâmico de valor igual a

2, que resulta da influência dinâmica nestes elementos pela interrupção brusca da onda de pressões e subpressões.

Além destas considerações acerca das pressões aerodinâmicas, no dimensionamento das barreiras sonoras deverão ter-se também em consideração as acções do vento, cujas características se poderão encontrar no EN 1991-4 ou, na falta dos anexos nacionais, no Regulamento de Segurança e Acções (RSA). Esta acção virá em forma de uma carga uniformemente distribuída na superfície da barreira. Os elementos de extremidade deverão ser caracterizados por um maior coeficiente de forma, para serem considerados os fenómenos de turbulência que se dão nestes pontos.

Conclui-se que, na barreira sonora, a combinação entre a acção do vento e as pressões aerodinâmicas, do lado da via, tornam-se incompatíveis, sendo que ambas resultam da movimentação de ar, o que significa que uma irá invalidar a outra. No entanto, verifica-se que esta combinação torna-se possível do lado contrário da barreira, admitindo a presença das subpressões de igual intensidade mas de sinal contrário, e considerando que a acção do vento poderá assumir qualquer dos dois sentidos.

Chegou-se também à conclusão que nessa combinação deveria ser reduzida a acção do vento, através do seu coeficiente Ψ_0 , considerando que em situações que o vento sopra a valores máximos, as velocidades de serviço serão diminuídas.

A posição mais desfavorável da superfície de cargas equivalentes, em combinação com a acção do vento, para o dimensionamento dos painéis, será aquela que permita que a resultante se encontre a meia largura destes. Admitindo que os painéis se encontrem simplesmente apoiados nos postes, os momentos máximos nos primeiros serão facilmente calculados pela aplicação das equações de equilíbrio isostático.

Em relação aos pilaretes a posição da resultante das cargas aerodinâmicas equivalentes será menos intuitiva e a sua escolha passará pela análise da linha de influência da reacção do pilarete. Para larguras estudadas de 5 e 4 metros, a reacção do pilarete será máxima quando a resultante da sucção se localizar sobre este.

Foi considerada uma barreira constituída por painéis de dimensões 5000x5000*120, com a finalidade de servir de padrão de comparação para que seja possível chegar-se às devidas conclusões. Estas dimensões permitem de facto a criação de uma situação ideal de comparação, considerando que os painéis possuem as dimensões exactas da superfície de pressões aerodinâmicas.

Nestas condições, verifica-se que, para os painéis e pilaretes internos, os esforços criados não significarão problemas de maior na solução de armadura calculada. De facto, para os painéis internos, considerando a utilização das malhas rectangulares Malhasol, a gama deste tipo de produto permite obter as resistências requisitadas mesmos nas situações mais extremas. Em relação aos pilaretes, basta a utilização de uma solução do tipo 4 ϕ 16+2 ϕ 12, que se torna totalmente viável, para se obter a resistência pretendida.

No entanto, como seria de esperar, verifica-se aumentos significativos de esforços para os painéis e pilaretes de extremidade. De facto, as soluções Malhasol deixam de satisfazer os requisitos de resistência impostos pelos esforços a que os painéis estarão sujeitos nos casos mais extremos. Em relação aos pilaretes de extremidades, estes esforços acrescidos, nestas condições, traduzem-se em soluções de armadura demasiadamente pesadas para a secção em estudo. Concluiu-se, no entanto, que, na prática, a instalação de barreiras a grandes proximidades da via não é frequente quando estas se caracterizam por altas velocidades. Assim, poder-se-á dizer que a geometria dos painéis e da secção do pilarete, neste caso, não levantaria grandes problemas.

Foram ainda estudadas a influência de vários factores na geometria dos painéis na necessidade de armadura nestes e nos pilaretes. O primeiro factor que se alterou foi a espessura do painel de 12 para 15 cm. Esta medida não influencia os esforços nos elementos, simplesmente altera a área resistente do betão no painel. Assim, é fácil perceber que esta alteração não terá qualquer influencia nos pilaretes.

Com esta alteração conclui-se, de facto, que existe uma redução significativa das armaduras necessários nos painéis. Neste caso, apenas com a utilização da rede Malhasol AR 64 pode-se obter as resistências necessárias nos painéis internos, em todas as situações de proximidade e velocidade. A solução Malhasol AR 82, necessária em certas condições, no caso dos painéis internos de espessura 12 cm, torna-se nesta situação apropriada mesmo para os painéis de extremidade até valores de 2m de proximidade a velocidades de 300 km/h.

O segundo factor geométrico estudado foi a alteração da largura dos painéis de 5 para 4 metros, que se revelou uma medida ainda mais eficaz na poupança de armadura do que o aumento da espessura. De facto verifica-se uma necessidade de armadura nos painéis bem inferior, sendo que para todas as condições estudadas, até para proximidades abaixo dos 2 metros e velocidades acima dos 300 km/h se consegue com a solução AR 82 obter as resistências requeridas, quer sejam os painéis internos ou externos.

Porém, a conclusão acerca da diminuição dos esforços como consequência da diminuição do vão criado pelos painéis, não se torna tão evidente em relação aos pilaretes. De facto, conclui-se pela análise da linha de influência da reacção do pilarete, que a diminuição do vão poderá não significar a diminuição dos esforços nestes. Neste caso, no entanto, assiste-se, de facto, a uma diminuição desses esforços, mas de uma forma muito pouco significativa. Quando se fala em pilaretes de extremidade a diminuição é ainda mais pequena, tornando as soluções de armadura virtualmente iguais às da utilização de painéis de 5 metros de largura.

A última alteração geométrica nos painéis foi o aumento da altura dos painéis de 5 para 7 metros. A alteração da altura dos painéis implicará que a altura dos pilaretes que os suportam também se altere. Esta alteração não influenciará, no entanto, os momentos máximos nos painéis, pois o vão criado por estes mantém-se. Assim, a análise, neste caso, passará unicamente pelos pilaretes.

Seria, então, de esperar que esta alteração se traduzisse num aumento significativo de esforços nos pilaretes resultante do aumento do braço da força resultante das pressões. Conclui-se, no entanto, que esse aumento não é muito significativo, que se deve ao facto de a pressão aerodinâmica atingir uma altura máxima de 5 metros, pelo que os últimos dois metros serão apenas sujeitos à acção do vento. Assim, as soluções de armadura a adoptar, não deverão diferir em muito das dos pilaretes que suportem painéis de 5 metros de altura.

Queria-se também perceber a influência da alteração do esquema estrutural da barreira, nomeadamente as vantagens inerentes à utilização de um terceiro apoio na base do painel. Conclui-se que este apoio extra se traduz em reduções significativas nos momentos máximos dos painéis. Em painéis de 5 metros de altura estas reduções foram da ordem dos 13%, para o exemplo apresentado. Curiosamente, em painéis de maiores alturas, e como resultado da menor pressão aplicada nos últimos dois metros, a redução nos momentos máximos será bem maior, na ordem dos 35%.

O dimensionamento paramétrico foi feito em forma de gráficos da variação das armaduras, com o objectivo de se perceber a solução de armadura a adoptar, para qualquer tipo de condições, de forma rápida e eficaz. No entanto, estes gráficos têm em consideração apenas a verificação ao estado limite último, pelo que não se deverá esquecer que para casa solução adoptada deverá ser feito a verificação ao estado limite de serviço. Conclui-se, no entanto, pela análise de um exemplo, que pelo menos para

situações de localizações da barreira a distâncias frequentemente usadas, estes limites serão verificados.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este trabalho baseou-se no estudo paramétrico dos vários factores que influenciam o dimensionamento das barreiras sonoras, tendo em consideração cargas estáticas equivalentes que representem os efeitos aerodinâmicos causados em linhas de alta velocidade.

No entanto, outros estudos deverão ser feitos em relação aos efeitos da alta velocidade neste tipo de estruturas verticais de proximidade às linhas. De facto fica, a faltar uma análise dinâmica em cargas móveis, que poderá levantar novos problemas estruturais às barreiras sonoras.

Outro aspecto não estudado é a interacção da fundação no comportamento estrutural da barreira. Os efeitos de fadiga nesta, resultante da resposta dinâmica da estrutura às cargas móveis, deverão também ser devidamente estudados.

BIBLIOGRAFIA:

- Brunbauer, W. (2006). *LÄRMSPOILER, FRIENDLY NOISE INNOVATIVE NOISE ABATEMENT TECHNOLOGY ALONG TRACKS AND ROADS*. Viena, 2006.
- Boothby, T., Burroughs, C., Bernecker, C., Manbeck, H., Ritter, M., Grgurevich, S., Cegelka, S., Lee, P. (1997). *Design of Wood Highway Sound Barrier*. USDA, Research Paper.
- Cornolo G. (1988). *Una leggenda che corre: breve storia dell'elettrotreno e dei suoi primati*. ETR..
- Coutinho, A. (2008). *Evaluations of the Sound Isolation of Liquid-Filled Panels*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- EN1990 "*Basis of Structural Design* ", European Committee for Standardization (CEN), Final PT Draft, Brussels, 2005.
- EN1991-2, "*Actions on Structures – Part 2: General Actions – Traffic loads on bridges*", European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2003.
- EN1991-1-4, "*Actions on Structures – Part 1-4: General Actions – Wind Actions*", European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2005.
- EN1992-1-1, "*Projecto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios*", European Committee for Standardization (CEN), Versão Portuguesa, Brussels, 2003
- FEDESPAB (2003). Ruído. In *Boas Práticas Ambientais Comércio e Serviço: Manual do Formando*, p. 151 – 177.
- FEUP (2009). *Descritor de Ruído*. Apontamentos de Impactos Ambientais e Sociais. FEUP, Porto.
- Fleming, G., Knauer, H., Lee, C. Pedersen, S. (2001). *FHWA Highway Noise Barrier Design Handbook*. FHWA, Washington DC.
- Gordon, W.J. (1910). *Our Home Railways, volume one*. London: Frederick Warne and Co. pp. 7–9.
- Hamilton, E. (1968). *The Pictorial Encyclopedia of Railways*. The Hamlyn Publishing Group. pp. 12 – 30.
- Hoffman, C. (2004) *TRANS-ATLANTIC MAGLEV: Vacuum Tube Train*. Popsi.com, 04/12/2004.
- Hoffmeister, B. (2007). *Dynamic response of noise protection walls at high speed railway lines*. RWTH, Aachen, Germany. In EVACES 07
- Hong Kong Government, Environment Protection Department, Highways Department, (2003). *Guideline on Design of Noise Barriers*. HK government, Hong Kong.
- Hood, Christopher P. (2006). *Shinkansen – From Bullet Train to Symbol of Modern Japan*. Routledge; London.
- Jamgocian, A. (1997). *Acoustic Properties of Concrete Blocks Filled With Recycled Material for Noise Barrier Application*. Dissertação de Mestrado, Albert Nerken School of Engineering.
- Japain Railway East press release (2008). *First Introduction of a 1st Class "Super Green Car" (tentative name) for New "Hayate" Shinkansen Trains (E5 Series)*. 8/04/2008.
- Lewis, M. J. T. (2001). *Railways in the Greek and Roman world*. University of Hull.
- Nordmann,T., Froelich, A., Goetzberger, A., Kleiss,G., Hille,G., Reise,C., Wiemken, E., Dijk,V., Betcke, J., Pearsall,N., Hynes,K., Gaidon,B., Castello, S. (2000). *THE POTENTIAL OF PV NOISE BARRIER TECHNOLOGY IN EUROPE*. Paper Presented at the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1 – 5 May 2000, Glasgow, United Kingdom.
- Pepy, G. (2006). 25 Years of the TGV. In *Modern Railways*, p. 67 – 74.

- Rocha, J. (2006). *An Economical and Environmental Evaluation of Photovoltaic Noise Barriers*. Master of science, University of Guelph.
- Rodrigues, V. (1984). *Atenuação da Poluição Sonora por meio de Vegetação Florestal*. CECIA – Comissão de Estudos e Coordenação da Infraestrutura Aeronáutica.
- RSA – *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Decreto – Lei nº235/83, de 31 de Maio.
- Rugless, R. (1999). *Melbourne Oz Innovative Sound Tube*. Tollroads Newsletter, Feb 1999.
- Schaik, L. (2004). *Craigieburn Bypass*. Architecture Australia.
- SonoFabril (2009). *Catálogos de Barreiras Sonoras*. SonoFabril, Lisboa.
- Sound Fighter Systems (2009). *Noise Barriers Catalog*. SF, Shreveport – LA.
- Walker, J., Pilton, A., Collins, G., Reaburn C., Gross, N. (2007). *Noise Wall Design Guideline*. RTA, Sidney.
- <http://www.campen.nl>, Van Campen Aluminium, Maio 2009.
- <http://www.cp.pt>, Comboio de Portugal, Março de 2009.
- <http://www.durisol.com>, Abril de 2009.
- <http://www.fomento.es>, Março de 2009.
- <http://www.kokosistemas.nl>, Koko Systems, Maio 2009.
- <http://www.oosterhuis.nl>, Oosterhuis Lénárd, Maio 2009.
- <http://www.rave.pt>, Rede Ferroviária de Alta Velocidade, Abril de 2009
- <http://www.renfe.es>, Red Nacional de Ferrocarriles Españoles, Abril de 2009
- <http://www.train-technology.com>, Março de 2009
- <http://www.uic.com>, International Union of Railways, Abril de 2009

ANEXO A

TABELAS PARA O DIMENSIONAMENTO PARAMÉTRICO

AI – PAINEL DE DIMENSÃO 5000x5000x120 MM

AII – PAINEL DE DIMENSÃO 5000x5000x150 MM

AIII – PAINEL DE DIMENSÃO 4000x5000x120 MM

AIV – PAINEL DE DIMENSÃO 5000x7000x120 MM

AV – ÁREAS DAS ARMADURAS MALHASOL E DOS VARÕES CONSIDERADOS

ANEXO AI - PAINEL DE DIMENSÃO 5000x5000x120 MM**ARMADURA NOS PAINÉIS CENTRAIS**

	Pressão vento kN/m ²	Coef. Min.	Coef. Maj.	Velocidade km/h	Distância m	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Coef. Maj.	Coef. Min.	P _{frequ} kN/m ²	Momento Máx. kN.m/m	Área Armadura cm ² /m
Painéis Centrais	0,864	0,6	1,5	300	3	1,156848205	1,5	1	2,5129	7,8527	1,8582
	0,864	0,6	1,5	250	3	0,800072034	1,5	1	1,9777	6,1803	1,4624
	0,864	0,6	1,5	200	3	0,514812912	1,5	1	1,5498	4,8432	1,1460
	0,864	0,6	1,5	160	3	0,344324126	1,5	1	1,2941	4,0440	0,9569
	0,864	0,6	1,5	120	3	0,152100095	1,5	1	1,0058	3,1430	0,7437
	0,864	0,6	1,5	300	1,5	3,317737111	1,5	1	5,7542	17,9819	4,2550
	0,864	0,6	1,5	300	2	2,142570352	1,5	1	3,9915	12,4733	2,9515
	0,864	0,6	1,5	300	4	0,747084107	1,5	1	1,8982	5,9320	1,4037
	0,864	0,6	1,5	300	5	0,532189471	1,5	1	1,5759	4,9246	1,1653
	0,864	0,6	1,5	300	6	0,403376677	1,5	1	1,3827	4,3208	1,0224
	0,864	0,6	1,5	250	1,5	2,297718092	1,5	1	4,2242	13,2006	3,1236
	0,864	0,6	1,5	250	2	1,482996024	1,5	1	3,0021	9,3815	2,2199
	0,864	0,6	1,5	250	4	0,516383472	1,5	1	1,5522	4,8505	1,1478
	0,864	0,6	1,5	250	5	0,367684476	1,5	1	1,3291	4,1535	0,9828
	0,864	0,6	1,5	250	6	0,278587379	1,5	1	1,1955	3,7359	0,8840
	0,864	0,6	1,5	200	1,5	1,504329023	1,5	1	3,0341	9,4815	2,2436
	0,864	0,6	1,5	200	2	0,963967981	1,5	1	2,2236	6,9486	1,6442
	0,864	0,6	1,5	200	4	0,329890041	1,5	1	1,2724	3,9764	0,9409
	0,864	0,6	1,5	200	5	0,233587401	1,5	1	1,1280	3,5249	0,8341
	0,864	0,6	1,5	200	6	0,176179766	1,5	1	1,0419	3,2558	0,7704
	0,864	0,6	1,5	160	1,5	1,219964506	1,5	1	2,6075	8,1486	1,9282
	0,864	0,6	1,5	160	2	0,721662272	1,5	1	1,8601	5,8128	1,3755
	0,864	0,6	1,5	160	4	0,203682754	1,5	1	1,0831	3,3848	0,8009
	0,864	0,6	1,5	160	5	0,135548116	1,5	1	0,9809	3,0654	0,7253
	0,864	0,6	1,5	160	6	0,09718242	1,5	1	0,9234	2,8855	0,6828
	0,864	0,6	1,5	120	1,5	0,445992995	1,5	1	1,4466	4,5206	1,0697
	0,864	0,6	1,5	120	2	0,285379727	1,5	1	1,2057	3,7677	0,8915
	0,864	0,6	1,5	120	4	0,097325034	1,5	1	0,9236	2,8862	0,6830
	0,864	0,6	1,5	120	5	0,068836729	1,5	1	0,8809	2,7527	0,6514
	0,864	0,6	1,5	120	6	0,051871754	1,5	1	0,8554	2,6731	0,6325

ARMADURA NOS PAINÉIS DE EXTREMIDADE

	Pressão vento kN/m ²	Coef. Min.	Coef. Maj.	Velocidade km/h	Distância m	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Coef. Maj.	Coef. Min.	P _{frequ} kN/m ²	Momento Máx. kN.m/m	Área Armadura cm ² /m
Painéis Extremos	1,296	0,6	1,5	300	3	2,313696411	1,5	1	4,6369	14,4905	3,4288
	1,296	0,6	1,5	250	3	1,600144069	1,5	1	3,5666	11,1457	2,6374
	1,296	0,6	1,5	200	3	1,029625824	1,5	1	2,7108	8,4714	2,0045
	1,296	0,6	1,5	160	3	0,688648251	1,5	1	2,1994	6,8730	1,6263
	1,296	0,6	1,5	120	3	0,304200189	1,5	1	1,6227	5,0709	1,1999
	1,296	0,6	1,5	300	1,5	6,635474221	1,5	1	11,1196	34,7488	8,2224
	1,296	0,6	1,5	300	2	4,285140703	1,5	1	7,5941	23,7316	5,6155
	1,296	0,6	1,5	300	4	1,494168214	1,5	1	3,4077	10,6489	2,5198
	1,296	0,6	1,5	300	5	1,064378941	1,5	1	2,7630	8,6343	2,0431
	1,296	0,6	1,5	300	6	0,806753354	1,5	1	2,3765	7,4267	1,7573
	1,296	0,6	1,5	250	1,5	4,595436183	1,5	1	8,0596	25,1861	5,9597
	1,296	0,6	1,5	250	2	2,965992048	1,5	1	5,6154	17,5481	4,1523
	1,296	0,6	1,5	250	4	1,032766944	1,5	1	2,7156	8,4861	2,0080
	1,296	0,6	1,5	250	5	0,735368951	1,5	1	2,2695	7,0920	1,6782
	1,296	0,6	1,5	250	6	0,557174757	1,5	1	2,0022	6,2568	1,4805
	1,296	0,6	1,5	200	1,5	3,008658045	1,5	1	5,6794	17,7481	4,1996
	1,296	0,6	1,5	200	2	1,927935962	1,5	1	4,0583	12,6822	3,0009
	1,296	0,6	1,5	200	4	0,659780083	1,5	1	2,1561	6,7377	1,5943
	1,296	0,6	1,5	200	5	0,467174803	1,5	1	1,8672	5,8349	1,3807
	1,296	0,6	1,5	200	6	0,352359531	1,5	1	1,6949	5,2967	1,2533
	1,296	0,6	1,5	160	1,5	2,439929012	1,5	1	4,8263	15,0822	3,5688
	1,296	0,6	1,5	160	2	1,443324543	1,5	1	3,3314	10,4106	2,4634
	1,296	0,6	1,5	160	4	0,407365508	1,5	1	1,7774	5,5545	1,3143
	1,296	0,6	1,5	160	5	0,271096232	1,5	1	1,5730	4,9158	1,1632
	1,296	0,6	1,5	160	6	0,194364841	1,5	1	1,4579	4,5561	1,0781
	1,296	0,6	1,5	120	1,5	0,89198599	1,5	1	2,5044	7,8262	1,8519
	1,296	0,6	1,5	120	2	0,570759454	1,5	1	2,0225	6,3204	1,4956
	1,296	0,6	1,5	120	4	0,194650068	1,5	1	1,4584	4,5574	1,0784
	1,296	0,6	1,5	120	5	0,137673458	1,5	1	1,3729	4,2903	1,0152
	1,296	0,6	1,5	120	6	0,103743507	1,5	1	1,3220	4,1313	0,9776

ARMADURA NOS PILARETES CENTRAIS

	Velocidade Km/h	Distância m	Pressão do vento kN/m ²	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Carga distribuída kN/m	Altura m	Msd Base kN.m	d m	μS_d	ω_1	As Cm ²
Pilaretes Centrais	300	3	0,8640	1,1568	9,311	5,000	116,384	0,324	0,266082	0,3369	10,46015
	250	3	0,8640	0,8001	7,638	5,000	95,479	0,324	0,218288	0,2659	8,257369
	200	3	0,8640	0,5148	6,301	5,000	78,765	0,324	0,180075	0,2125	6,598189
	160	3	0,8640	0,3443	5,502	5,000	68,775	0,324	0,157236	0,182	5,649852
	120	3	0,8640	0,1521	4,601	5,000	57,512	0,324	0,131486	0,1488	4,619463
	300	2	0,8640	2,1426	13,931	5,000	174,141	0,324	0,398128	0,5566	17,28349
	300	4	0,8640	0,7471	7,390	5,000	92,374	0,324	0,21119	0,2558	7,942313
	300	5	0,8640	0,5322	6,383	5,000	79,783	0,324	0,182403	0,2157	6,696664
	300	6	0,8640	0,4034	5,779	5,000	72,235	0,324	0,165147	0,1924	5,974663
	250	2	0,8640	1,4830	10,840	5,000	135,494	0,324	0,309772	0,4057	12,59794
	250	4	0,8640	0,5164	6,309	5,000	78,857	0,324	0,180285	0,2128	6,607075
	250	5	0,8640	0,3677	5,612	5,000	70,144	0,324	0,160366	0,1861	5,777878
	250	6	0,8640	0,2786	5,194	5,000	64,923	0,324	0,14843	0,1705	5,292847
	200	2	0,8640	0,9640	8,407	5,000	105,082	0,324	0,240243	0,298	9,251671
	200	4	0,8640	0,3299	5,434	5,000	67,929	0,324	0,155303	0,1794	5,57105
	200	5	0,8640	0,2336	4,983	5,000	62,287	0,324	0,142402	0,1627	5,051236
	200	6	0,8640	0,1762	4,714	5,000	58,923	0,324	0,134712	0,1529	4,746282
	160	2	0,8640	0,7217	7,271	5,000	90,885	0,324	0,207784	0,251	7,79227
	160	4	0,8640	0,2037	4,843	5,000	60,535	0,324	0,138396	0,1575	4,891922
	160	5	0,8640	0,1355	4,523	5,000	56,542	0,324	0,129269	0,146	4,532664
	160	6	0,8640	0,0972	4,344	5,000	54,294	0,324	0,12413	0,1395	4,332647
	120	2	0,8640	0,2854	5,226	5,000	65,321	0,324	0,14934	0,1716	5,329512
	120	4	0,8640	0,0973	4,344	5,000	54,303	0,324	0,124149	0,1396	4,333387
	120	5	0,8640	0,0688	4,211	5,000	52,633	0,324	0,120332	0,1348	4,185922
	120	6	0,8640	0,0519	4,131	5,000	51,639	0,324	0,11806	0,132	4,098536

ARMADURA NOS PILARETES DE EXTREMIDADE

	Velocidade Km/h	Distância m	Pressão do vento kN/m ²	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Carga distribuída kN/m	Altura m	Msd Base kN.m	d m	μSd	ω1	As Cm ²
Pilaretes Extremos	300	3	1,2960	2,3137	16,677	5,000	208,468	0,324	0,476608	0,7038	21,85182
	250	3	1,2960	1,6001	13,333	5,000	166,658	0,324	0,381021	0,5262	16,33843
	200	3	1,2960	1,0296	10,658	5,000	133,230	0,324	0,304595	0,3974	12,33841
	160	3	1,2960	0,6886	9,060	5,000	113,250	0,324	0,258917	0,326	10,12092
	120	3	1,2960	0,3042	7,258	5,000	90,724	0,324	0,207417	0,2504	7,776129
	300	2	1,2960	4,2851	25,919	5,000	323,982	0,324	0,740701	1,2893	40,03395
	300	4	1,2960	1,4942	12,836	5,000	160,449	0,324	0,366824	0,5014	15,56798
	300	5	1,2960	1,0644	10,821	5,000	135,266	0,324	0,30925	0,4049	12,5717
	300	6	1,2960	0,8068	9,614	5,000	120,171	0,324	0,274739	0,3502	10,87433
	250	2	1,2960	2,9660	19,735	5,000	246,689	0,324	0,563989	0,8821	27,38832
	250	4	1,2960	1,0328	10,673	5,000	133,414	0,324	0,305015	0,398	12,35944
	250	5	1,2960	0,7354	9,279	5,000	115,988	0,324	0,265176	0,3355	10,4171
	250	6	1,2960	0,5572	8,444	5,000	105,547	0,324	0,241305	0,2995	9,300519
	200	2	1,2960	1,9279	14,869	5,000	185,865	0,324	0,424931	0,6055	18,80072
	200	4	1,2960	0,6598	8,925	5,000	111,559	0,324	0,25505	0,3201	9,939133
	200	5	1,2960	0,4672	8,022	5,000	100,274	0,324	0,229249	0,2818	8,750019
	200	6	1,2960	0,3524	7,484	5,000	93,546	0,324	0,213868	0,2596	8,060834
	160	2	1,2960	1,4433	12,598	5,000	157,470	0,324	0,360013	0,4896	15,20279
	160	4	1,2960	0,4074	7,742	5,000	96,769	0,324	0,221237	0,2702	8,389177
	160	5	1,2960	0,2711	7,103	5,000	88,785	0,324	0,202982	0,2442	7,581925
	160	6	1,2960	0,1944	6,743	5,000	84,289	0,324	0,192704	0,2298	7,13648
	120	2	1,2960	0,5708	8,507	5,000	106,343	0,324	0,243125	0,3022	9,384396
	120	4	1,2960	0,1947	6,744	5,000	84,305	0,324	0,192742	0,2299	7,138123
	120	5	1,2960	0,1377	6,477	5,000	80,967	0,324	0,185109	0,2194	6,811586
	120	6	1,2960	0,1037	6,318	5,000	78,979	0,324	0,180564	0,2132	6,618849

ANEXO AII - PAINEL DE DIMENSÃO 5000x5000x150 mm**ARMADURA NOS PAINÉIS CENTRAIS**

	Pressão vento kN/m ²	Coef. Min.	Coef. Maj.	Velocidade km/h	Distância m	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Coef. Maj.	Coef. Min.	P _{freq} kN/m ²	Momento Máx. kN.m/m	Área Armadura cm ² /m
Painéis Centrais	0,864	0,6	1,5	300	3	1,156848205	1,5	1	2,5129	7,8527	1,4865
	0,864	0,6	1,5	250	3	0,800072034	1,5	1	1,9777	6,1803	1,1699
	0,864	0,6	1,5	200	3	0,514812912	1,5	1	1,5498	4,8432	0,9168
	0,864	0,6	1,5	160	3	0,344324126	1,5	1	1,2941	4,0440	0,7655
	0,864	0,6	1,5	120	3	0,152100095	1,5	1	1,0058	3,1430	0,5950
	0,864	0,6	1,5	300	1,5	3,317737111	1,5	1	5,7542	17,9819	3,4040
	0,864	0,6	1,5	300	2	2,142570352	1,5	1	3,9915	12,4733	2,3612
	0,864	0,6	1,5	300	4	0,747084107	1,5	1	1,8982	5,9320	1,1229
	0,864	0,6	1,5	300	5	0,532189471	1,5	1	1,5759	4,9246	0,9322
	0,864	0,6	1,5	300	6	0,403376677	1,5	1	1,3827	4,3208	0,8179
	0,864	0,6	1,5	250	1,5	2,297718092	1,5	1	4,2242	13,2006	2,4989
	0,864	0,6	1,5	250	2	1,482996024	1,5	1	3,0021	9,3815	1,7759
	0,864	0,6	1,5	250	4	0,516383472	1,5	1	1,5522	4,8505	0,9182
	0,864	0,6	1,5	250	5	0,367684476	1,5	1	1,3291	4,1535	0,7863
	0,864	0,6	1,5	250	6	0,278587379	1,5	1	1,1955	3,7359	0,7072
	0,864	0,6	1,5	200	1,5	1,504329023	1,5	1	3,0341	9,4815	1,7949
	0,864	0,6	1,5	200	2	0,963967981	1,5	1	2,2236	6,9486	1,3154
	0,864	0,6	1,5	200	4	0,329890041	1,5	1	1,2724	3,9764	0,7527
	0,864	0,6	1,5	200	5	0,233587401	1,5	1	1,1280	3,5249	0,6673
	0,864	0,6	1,5	200	6	0,176179766	1,5	1	1,0419	3,2558	0,6163
	0,864	0,6	1,5	160	1,5	1,219964506	1,5	1	2,6075	8,1486	1,5425
	0,864	0,6	1,5	160	2	0,721662272	1,5	1	1,8601	5,8128	1,1004
	0,864	0,6	1,5	160	4	0,203682754	1,5	1	1,0831	3,3848	0,6407
	0,864	0,6	1,5	160	5	0,135548116	1,5	1	0,9809	3,0654	0,5803
	0,864	0,6	1,5	160	6	0,09718242	1,5	1	0,9234	2,8855	0,5462
	0,864	0,6	1,5	120	1,5	0,445992995	1,5	1	1,4466	4,5206	0,8557
	0,864	0,6	1,5	120	2	0,285379727	1,5	1	1,2057	3,7677	0,7132
	0,864	0,6	1,5	120	4	0,097325034	1,5	1	0,9236	2,8862	0,5464
	0,864	0,6	1,5	120	5	0,068836729	1,5	1	0,8809	2,7527	0,5211
	0,864	0,6	1,5	120	6	0,051871754	1,5	1	0,8554	2,6731	0,5060

ARMADURA NOS PAINÉIS DE EXTREMIDADE

	Pressão vento kN/m ²	Coef. Min.	Coef. Maj.	Velocidade km/h	Distância m	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Coef. Maj.	Coef. Min.	P _{frequ} kN/m ²	Momento Máx. kN.m/m	Área Armadura cm ² /m
Painéis Extremos	1,296	0,6	1,5	300	3	2,313696411	1,5	1	4,6369	14,4905	2,7430
	1,296	0,6	1,5	250	3	1,600144069	1,5	1	3,5666	11,1457	2,1099
	1,296	0,6	1,5	200	3	1,029625824	1,5	1	2,7108	8,4714	1,6036
	1,296	0,6	1,5	160	3	0,688648251	1,5	1	2,1994	6,8730	1,3011
	1,296	0,6	1,5	120	3	0,304200189	1,5	1	1,6227	5,0709	0,9599
	1,296	0,6	1,5	300	1,5	6,635474221	1,5	1	11,1196	34,7488	6,5780
	1,296	0,6	1,5	300	2	4,285140703	1,5	1	7,5941	23,7316	4,4924
	1,296	0,6	1,5	300	4	1,494168214	1,5	1	3,4077	10,6489	2,0158
	1,296	0,6	1,5	300	5	1,064378941	1,5	1	2,7630	8,6343	1,6345
	1,296	0,6	1,5	300	6	0,806753354	1,5	1	2,3765	7,4267	1,4059
	1,296	0,6	1,5	250	1,5	4,595436183	1,5	1	8,0596	25,1861	4,7677
	1,296	0,6	1,5	250	2	2,965992048	1,5	1	5,6154	17,5481	3,3219
	1,296	0,6	1,5	250	4	1,032766944	1,5	1	2,7156	8,4861	1,6064
	1,296	0,6	1,5	250	5	0,735368951	1,5	1	2,2695	7,0920	1,3425
	1,296	0,6	1,5	250	6	0,557174757	1,5	1	2,0022	6,2568	1,1844
	1,296	0,6	1,5	200	1,5	3,008658045	1,5	1	5,6794	17,7481	3,3597
	1,296	0,6	1,5	200	2	1,927935962	1,5	1	4,0583	12,6822	2,4007
	1,296	0,6	1,5	200	4	0,659780083	1,5	1	2,1561	6,7377	1,2755
	1,296	0,6	1,5	200	5	0,467174803	1,5	1	1,8672	5,8349	1,1045
	1,296	0,6	1,5	200	6	0,352359531	1,5	1	1,6949	5,2967	1,0027
	1,296	0,6	1,5	160	1,5	2,439929012	1,5	1	4,8263	15,0822	2,8551
	1,296	0,6	1,5	160	2	1,443324543	1,5	1	3,3314	10,4106	1,9707
	1,296	0,6	1,5	160	4	0,407365508	1,5	1	1,7774	5,5545	1,0515
	1,296	0,6	1,5	160	5	0,271096232	1,5	1	1,5730	4,9158	0,9306
	1,296	0,6	1,5	160	6	0,194364841	1,5	1	1,4579	4,5561	0,8625
	1,296	0,6	1,5	120	1,5	0,89198599	1,5	1	2,5044	7,8262	1,4815
	1,296	0,6	1,5	120	2	0,570759454	1,5	1	2,0225	6,3204	1,1965
	1,296	0,6	1,5	120	4	0,194650068	1,5	1	1,4584	4,5574	0,8627
	1,296	0,6	1,5	120	5	0,137673458	1,5	1	1,3729	4,2903	0,8122
	1,296	0,6	1,5	120	6	0,103743507	1,5	1	1,3220	4,1313	0,7821

ANEXO AIII - PAINEL DE DIMENSÃO 4000x5000x120 MM**ARMADURA NOS PAINÉIS CENTRAIS**

	Pressão vento kN/m ²	Coef. Min.	Coef. Maj.	Velocidade km/h	Distância m	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Coef. Maj.	Coef. Min.	P _{freq} kN/m ²	Momento Máx. kN.m/m	Área Armadura cm ² /m
Painéis Centrais	0,864	0,6	1,5	300	3	1,156848205	1,5	1	2,5129	5,0257	1,1892
	0,864	0,6	1,5	250	3	0,800072034	1,5	1	1,9777	3,9554	0,9360
	0,864	0,6	1,5	200	3	0,514812912	1,5	1	1,5498	3,0996	0,7335
	0,864	0,6	1,5	160	3	0,344324126	1,5	1	1,2941	2,5882	0,6124
	0,864	0,6	1,5	120	3	0,152100095	1,5	1	1,0058	2,0115	0,4760
	0,864	0,6	1,5	300	1,5	3,317737111	1,5	1	5,7542	11,5084	2,7232
	0,864	0,6	1,5	300	2	2,142570352	1,5	1	3,9915	7,9829	1,8890
	0,864	0,6	1,5	300	4	0,747084107	1,5	1	1,8982	3,7965	0,8983
	0,864	0,6	1,5	300	5	0,532189471	1,5	1	1,5759	3,1518	0,7458
	0,864	0,6	1,5	300	6	0,403376677	1,5	1	1,3827	2,7653	0,6543
	0,864	0,6	1,5	250	1,5	2,297718092	1,5	1	4,2242	8,4484	1,9991
	0,864	0,6	1,5	250	2	1,482996024	1,5	1	3,0021	6,0042	1,4207
	0,864	0,6	1,5	250	4	0,516383472	1,5	1	1,5522	3,1044	0,7346
	0,864	0,6	1,5	250	5	0,367684476	1,5	1	1,3291	2,6583	0,6290
	0,864	0,6	1,5	250	6	0,278587379	1,5	1	1,1955	2,3910	0,5658
	0,864	0,6	1,5	200	1,5	1,504329023	1,5	1	3,0341	6,0682	1,4359
	0,864	0,6	1,5	200	2	0,963967981	1,5	1	2,2236	4,4471	1,0523
	0,864	0,6	1,5	200	4	0,329890041	1,5	1	1,2724	2,5449	0,6022
	0,864	0,6	1,5	200	5	0,233587401	1,5	1	1,1280	2,2560	0,5338
	0,864	0,6	1,5	200	6	0,176179766	1,5	1	1,0419	2,0837	0,4931
	0,864	0,6	1,5	160	1,5	1,219964506	1,5	1	2,6075	5,2151	1,2340
	0,864	0,6	1,5	160	2	0,721662272	1,5	1	1,8601	3,7202	0,8803
	0,864	0,6	1,5	160	4	0,203682754	1,5	1	1,0831	2,1662	0,5126
	0,864	0,6	1,5	160	5	0,135548116	1,5	1	0,9809	1,9618	0,4642
	0,864	0,6	1,5	160	6	0,09718242	1,5	1	0,9234	1,8467	0,4370
	0,864	0,6	1,5	120	1,5	0,445992995	1,5	1	1,4466	2,8932	0,6846
	0,864	0,6	1,5	120	2	0,285379727	1,5	1	1,2057	2,4113	0,5706
	0,864	0,6	1,5	120	4	0,097325034	1,5	1	0,9236	1,8472	0,4371
	0,864	0,6	1,5	120	5	0,068836729	1,5	1	0,8809	1,7617	0,4169
	0,864	0,6	1,5	120	6	0,051871754	1,5	1	0,8554	1,7108	0,4048

ARMADURA NOS PAINÉIS DE EXTREMIDADE

	Pressão vento kN/m ²	Coef. Min.	Coef. Maj.	Velocidade km/h	Distância m	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Coef. Maj.	Coef. Min.	P _{freq} kN/m ²	Momento Máx. kN.m/m	Área Armadura cm ² /m
Painéis Extremos	1,296	0,6	1,5	300	3	2,313696411	1,5	1	4,6369	9,2739	2,1944
	1,296	0,6	1,5	250	3	1,600144069	1,5	1	3,5666	7,1332	1,6879
	1,296	0,6	1,5	200	3	1,029625824	1,5	1	2,7108	5,4217	1,2829
	1,296	0,6	1,5	160	3	0,688648251	1,5	1	2,1994	4,3987	1,0409
	1,296	0,6	1,5	120	3	0,304200189	1,5	1	1,6227	3,2454	0,7679
	1,296	0,6	1,5	300	1,5	6,635474221	1,5	1	11,1196	22,2392	5,2624
	1,296	0,6	1,5	300	2	4,285140703	1,5	1	7,5941	15,1882	3,5939
	1,296	0,6	1,5	300	4	1,494168214	1,5	1	3,4077	6,8153	1,6127
	1,296	0,6	1,5	300	5	1,064378941	1,5	1	2,7630	5,5259	1,3076
	1,296	0,6	1,5	300	6	0,806753354	1,5	1	2,3765	4,7531	1,1247
	1,296	0,6	1,5	250	1,5	4,595436183	1,5	1	8,0596	16,1191	3,8142
	1,296	0,6	1,5	250	2	2,965992048	1,5	1	5,6154	11,2308	2,6575
	1,296	0,6	1,5	250	4	1,032766944	1,5	1	2,7156	5,4311	1,2851
	1,296	0,6	1,5	250	5	0,735368951	1,5	1	2,2695	4,5389	1,0740
	1,296	0,6	1,5	250	6	0,557174757	1,5	1	2,0022	4,0043	0,9475
	1,296	0,6	1,5	200	1,5	3,008658045	1,5	1	5,6794	11,3588	2,6878
	1,296	0,6	1,5	200	2	1,927935962	1,5	1	4,0583	8,1166	1,9206
	1,296	0,6	1,5	200	4	0,659780083	1,5	1	2,1561	4,3121	1,0204
	1,296	0,6	1,5	200	5	0,467174803	1,5	1	1,8672	3,7343	0,8836
	1,296	0,6	1,5	200	6	0,352359531	1,5	1	1,6949	3,3899	0,8021
	1,296	0,6	1,5	160	1,5	2,439929012	1,5	1	4,8263	9,6526	2,2840
	1,296	0,6	1,5	160	2	1,443324543	1,5	1	3,3314	6,6628	1,5766
	1,296	0,6	1,5	160	4	0,407365508	1,5	1	1,7774	3,5549	0,8412
	1,296	0,6	1,5	160	5	0,271096232	1,5	1	1,5730	3,1461	0,7444
	1,296	0,6	1,5	160	6	0,194364841	1,5	1	1,4579	2,9159	0,6900
	1,296	0,6	1,5	120	1,5	0,89198599	1,5	1	2,5044	5,0088	1,1852
	1,296	0,6	1,5	120	2	0,570759454	1,5	1	2,0225	4,0451	0,9572
	1,296	0,6	1,5	120	4	0,194650068	1,5	1	1,4584	2,9168	0,6902
	1,296	0,6	1,5	120	5	0,137673458	1,5	1	1,3729	2,7458	0,6497
	1,296	0,6	1,5	120	6	0,103743507	1,5	1	1,3220	2,6440	0,6256

ARMADURA NOS PILARETES CENTRAIS

	Velocidade Km/h	Distância m	Pressão do vento kN/m ²	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Carga distribuída kN/m	Altura m	Msd Base kN.m	d m	μS_d	ω_1	As Cm ²
Pilaretes Centrais	300	3	0,8640	1,1568	8,967	5,000	112,087	0,324	0,256257	0,321925	9,995759
	250	3	0,8640	0,8001	7,161	5,000	89,510	0,324	0,20464	0,246518	7,654372
	200	3	0,8640	0,5148	5,717	5,000	71,458	0,324	0,16337	0,19006	5,901352
	160	3	0,8640	0,3443	4,854	5,000	60,669	0,324	0,138704	0,157943	4,904136
	120	3	0,8640	0,1521	3,880	5,000	48,505	0,324	0,110894	0,123192	3,8251
	300	2	0,8640	2,1426	13,957	5,000	174,465	0,324	0,398867	0,557962	17,32473
	300	4	0,8640	0,7471	6,893	5,000	86,156	0,324	0,196974	0,235773	7,320743
	300	5	0,8640	0,5322	5,805	5,000	72,558	0,324	0,165884	0,193401	6,005112
	300	6	0,8640	0,4034	5,152	5,000	64,406	0,324	0,147248	0,16893	5,245267
	250	2	0,8640	1,4830	10,618	5,000	132,726	0,324	0,303443	0,39552	12,2809
	250	4	0,8640	0,5164	5,725	5,000	71,557	0,324	0,163597	0,190361	5,910714
	250	5	0,8640	0,3677	4,972	5,000	62,148	0,324	0,142084	0,162272	5,038541
	250	6	0,8640	0,2786	4,521	5,000	56,509	0,324	0,129194	0,145885	4,529723
	200	2	0,8640	0,9640	7,990	5,000	99,881	0,324	0,228352	0,280496	8,709414
	200	4	0,8640	0,3299	4,780	5,000	59,756	0,324	0,136616	0,15528	4,821443
	200	5	0,8640	0,2336	4,293	5,000	53,662	0,324	0,122683	0,137735	4,276658
	200	6	0,8640	0,1762	4,002	5,000	50,029	0,324	0,114378	0,12746	3,957638
	160	2	0,8640	0,7217	6,764	5,000	84,548	0,324	0,193296	0,230659	7,161975
	160	4	0,8640	0,2037	4,142	5,000	51,769	0,324	0,118357	0,132365	4,10994
	160	5	0,8640	0,1355	3,797	5,000	47,458	0,324	0,108499	0,120272	3,734432
	160	6	0,8640	0,0972	3,602	5,000	45,030	0,324	0,102949	0,113547	3,525644
	120	2	0,8640	0,2854	4,555	5,000	56,939	0,324	0,130176	0,147122	4,56815
	120	4	0,8640	0,0973	3,603	5,000	45,039	0,324	0,102969	0,113572	3,526417
	120	5	0,8640	0,0688	3,459	5,000	43,236	0,324	0,098848	0,108619	3,372614
	120	6	0,8640	0,0519	3,373	5,000	42,163	0,324	0,096393	0,105685	3,281525

ARMADURA NOS PILARETES DE EXTREMIDADE

	Velocidade Km/h	Distância m	Pressão do vento kN/m ²	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Carga distribuída kN/m	Altura m	Msd Base kN.m	d m	μ Sd	ω 1	As Cm ²
Pilaretes Extremos	300	3	1,2960	2,3137	16,379	5,000	204,734	0,324	0,46807	0,687159	21,33627
	250	3	1,2960	1,6001	12,766	5,000	159,579	0,324	0,364836	0,497941	15,46106
	200	3	1,2960	1,0296	9,878	5,000	123,476	0,324	0,282295	0,361986	11,23967
	160	3	1,2960	0,6886	8,152	5,000	101,899	0,324	0,232964	0,287236	8,918692
	120	3	1,2960	0,3042	6,206	5,000	77,570	0,324	0,177344	0,208795	6,483072
	300	2	1,2960	4,2851	26,359	5,000	329,489	0,324	0,75329	1,320736	41,00885
	300	4	1,2960	1,4942	12,230	5,000	152,873	0,324	0,349504	0,471656	14,64493
	300	5	1,2960	1,0644	10,054	5,000	125,675	0,324	0,287323	0,369878	11,48471
	300	6	1,2960	0,8068	8,750	5,000	109,372	0,324	0,250051	0,312577	9,705506
	250	2	1,2960	2,9660	19,681	5,000	246,012	0,324	0,562441	0,878781	27,28614
	250	4	1,2960	1,0328	9,894	5,000	123,675	0,324	0,28275	0,362697	11,26175
	250	5	1,2960	0,7354	8,388	5,000	104,855	0,324	0,239724	0,297191	9,227777
	250	6	1,2960	0,5572	7,486	5,000	93,579	0,324	0,213943	0,259715	8,064143
	200	2	1,2960	1,9279	14,426	5,000	180,322	0,324	0,412259	0,582217	18,07784
	200	4	1,2960	0,6598	8,006	5,000	100,072	0,324	0,228788	0,281131	8,72913
	200	5	1,2960	0,4672	7,031	5,000	87,883	0,324	0,200922	0,241292	7,492118
	200	6	1,2960	0,3524	6,449	5,000	80,618	0,324	0,184311	0,218282	6,777654
	160	2	1,2960	1,4433	11,972	5,000	149,655	0,324	0,342148	0,459213	14,25855
	160	4	1,2960	0,4074	6,728	5,000	84,099	0,324	0,192269	0,229237	7,117803
	160	5	1,2960	0,2711	6,038	5,000	75,475	0,324	0,172554	0,202329	6,28233
	160	6	1,2960	0,1944	5,650	5,000	70,620	0,324	0,161453	0,18752	5,822508
	120	2	1,2960	0,5708	7,555	5,000	94,438	0,324	0,215908	0,262525	8,1514
	120	4	1,2960	0,1947	5,651	5,000	70,638	0,324	0,161495	0,187575	5,824203
	120	5	1,2960	0,1377	5,363	5,000	67,032	0,324	0,153251	0,176737	5,487695
	120	6	1,2960	0,1037	5,191	5,000	64,885	0,324	0,148343	0,170348	5,289306

ANEXO AIII - PAINEL DE DIMENSÃO 5000x7000x120 MM
ARMADURA NOS PILARETES INTERNOS

	Velocidade Km/h	Distância m	Pressão do vento kN/m ²	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Carga distribuída kN/m	Altura m	Msd Base kN.m	d m	μ Sd	ω 1	As Cm ²
Pilaretes Centrais	300	3	0,8640	1,1568	9,311	7,000	121,050	0,324	0,276748	0,353338	10,97114
	250	3	0,8640	0,8001	7,638	7,000	100,145	0,324	0,228955	0,281375	8,736696
	200	3	0,8640	0,5148	6,301	7,000	83,430	0,324	0,190742	0,227124	7,052203
	160	3	0,8640	0,3443	5,502	7,000	73,441	0,324	0,167903	0,196095	6,088738
	120	3	0,8640	0,1521	4,601	7,000	62,178	0,324	0,142153	0,16236	5,041292
	300	2	0,8640	2,1426	13,931	7,000	178,807	0,324	0,408795	0,575908	17,88194
	300	4	0,8640	0,7471	7,390	7,000	97,040	0,324	0,221857	0,271077	8,416938
	300	5	0,8640	0,5322	6,383	7,000	84,449	0,324	0,193069	0,230345	7,15222
	300	6	0,8640	0,4034	5,779	7,000	76,901	0,324	0,175814	0,206724	6,418789
	250	2	0,8640	1,4830	10,840	7,000	140,160	0,324	0,320439	0,42312	13,13787
	250	4	0,8640	0,5164	6,309	7,000	83,522	0,324	0,190952	0,227415	7,061229
	250	5	0,8640	0,3677	5,612	7,000	74,810	0,324	0,171032	0,200285	6,218837
	250	6	0,8640	0,2786	5,194	7,000	69,589	0,324	0,159097	0,184409	5,7259
	200	2	0,8640	0,9640	8,407	7,000	109,748	0,324	0,25091	0,313866	9,745541
	200	4	0,8640	0,3299	5,434	7,000	72,595	0,324	0,16597	0,193515	6,008656
	200	5	0,8640	0,2336	4,983	7,000	66,952	0,324	0,153069	0,176499	5,480296
	200	6	0,8640	0,1762	4,714	7,000	63,589	0,324	0,145379	0,166514	5,170248
	160	2	0,8640	0,7217	7,271	7,000	95,550	0,324	0,218451	0,266172	8,264639
	160	4	0,8640	0,2037	4,843	7,000	65,200	0,324	0,149063	0,171283	5,318328
	160	5	0,8640	0,1355	4,523	7,000	61,208	0,324	0,139936	0,159518	4,953024
	160	6	0,8640	0,0972	4,344	7,000	58,960	0,324	0,134796	0,152966	4,749603
	120	2	0,8640	0,2854	5,226	7,000	69,987	0,324	0,160007	0,185609	5,763168
	120	4	0,8640	0,0973	4,344	7,000	58,968	0,324	0,134815	0,152991	4,750356
	120	5	0,8640	0,0688	4,211	7,000	57,299	0,324	0,130999	0,14816	4,600363
	120	6	0,8640	0,0519	4,131	7,000	56,305	0,324	0,128726	0,145297	4,511471

ARMADURA NOS PILARETES DE EXTREMIDADE

	Velocidade Km/h	Distância m	Pressão do vento kN/m ²	Pressão aerodinâmica kN/m ²	Carga distribuída kN/m	Altura m	Msd Base kN.m	d m	μS_d	ω_1	As Cm ²
Pilaretes Extremos	300	3	1,2960	2,3137	16,677	7,000	215,467	0,324	0,492608	0,73527	22,83013
	250	3	1,2960	1,6001	13,333	7,000	173,657	0,324	0,397021	0,554646	17,22176
	200	3	1,2960	1,0296	10,658	7,000	140,228	0,324	0,320595	0,423375	13,1458
	160	3	1,2960	0,6886	9,060	7,000	120,249	0,324	0,274917	0,350497	10,88293
	120	3	1,2960	0,3042	7,258	7,000	97,723	0,324	0,223417	0,273332	8,486967
	300	2	1,2960	4,2851	25,919	7,000	330,981	0,324	0,756701	1,329297	41,27466
	300	4	1,2960	1,4942	12,836	7,000	167,447	0,324	0,382824	0,529379	16,43721
	300	5	1,2960	1,0644	10,821	7,000	142,264	0,324	0,32525	0,431038	13,38372
	300	6	1,2960	0,8068	9,614	7,000	127,169	0,324	0,290739	0,375268	11,65206
	250	2	1,2960	2,9660	19,735	7,000	253,687	0,324	0,579989	0,916375	28,45345
	250	4	1,2960	1,0328	10,673	7,000	140,412	0,324	0,321015	0,424066	13,16725
	250	5	1,2960	0,7354	9,279	7,000	122,986	0,324	0,281176	0,360236	11,18533
	250	6	1,2960	0,5572	8,444	7,000	112,545	0,324	0,257305	0,323511	10,04503
	200	2	1,2960	1,9279	14,869	7,000	192,863	0,324	0,440931	0,635352	19,72768
	200	4	1,2960	0,6598	8,925	7,000	118,557	0,324	0,27105	0,344519	10,6973
	200	5	1,2960	0,4672	8,022	7,000	107,272	0,324	0,245249	0,305396	9,482549
	200	6	1,2960	0,3524	7,484	7,000	100,544	0,324	0,229868	0,282708	8,778083
	160	2	1,2960	1,4433	12,598	7,000	164,468	0,324	0,376013	0,517399	16,06525
	160	4	1,2960	0,4074	7,742	7,000	103,767	0,324	0,237237	0,293518	9,113747
	160	5	1,2960	0,2711	7,103	7,000	95,783	0,324	0,218982	0,266936	8,288358
	160	6	1,2960	0,1944	6,743	7,000	91,287	0,324	0,208704	0,252261	7,832699
	120	2	1,2960	0,5708	8,507	7,000	113,341	0,324	0,259125	0,326271	10,13071
	120	4	1,2960	0,1947	6,744	7,000	91,304	0,324	0,208742	0,252315	7,83438
	120	5	1,2960	0,1377	6,477	7,000	87,965	0,324	0,201109	0,241554	7,500259
	120	6	1,2960	0,1037	6,318	7,000	85,977	0,324	0,196564	0,235201	7,303006

AV – ÁREAS DAS ARMADURAS MALHASOL E DOS VARÕES CONSIDERADOS

Redes Rectangulares Electrosoldadas Malhasol para Painéis*

AR 30	AR 34	AR 38	AR 42	AR 46	AR 50	AR 55	AR 60	AR 65	AR 70	AR 76	AR 82
0,7065	0,90746	1,13354	1,38474	1,66106	1,9625	2,374625	2,826	3,316625	3,8465	4,53416	5,27834

* Escala de cores usada nos gráficos. Áreas em cm²/m

Soluções de Armadura para Pilaretes

4Ø12	6Ø12	4Ø16+2Ø12	6Ø16	4Ø20+2Ø16	6Ø20	4Ø25+2Ø20	6Ø25	4Ø30+2Ø25	6Ø30	4Ø36+2Ø30	6Ø36
4,5216	6,7824	10,2992	12,0576	16,5792	18,84	25,905	29,4375	38,0725	42,39	49,2244	61,0416

* Escala de cores usada nos gráficos. Áreas em cm²